



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ORIGEM, COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE SAIS SUPERFICIAIS NAS
MONTANHAS ELLSWORTH, ANTÁRTICA OCIDENTAL

Juliana Guimarães Ribeiro de Souza

MONOGRAFIA nº444

Ouro Preto, agosto de 2022

**ORIGEM, COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE SAIS
SUPERFICIAIS NAS MONTANHAS ELLSWORTH,
ANTÁRTICA OCIDENTAL**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº444

ORIGEM, COMPOSIÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE SAIS SUPERFICIAIS NAS MONTANHAS ELLSWORTH, ANTÁRTICA OCIDENTAL

Juliana Guimarães Ribeiro de Souza

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Alice Fernanda de Oliveira Costa

Co-Orientadora

Prof.^a Dr.^a Caroline Delpupo Souza

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/2.

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729o Souza, Juliana Guimarães Ribeiro de.
Origem, composição e distribuição de sais superficiais nas Montanhas Ellsworth, Antártica Ocidental. [manuscrito] / Juliana Guimarães Ribeiro de Souza. - 2022.
38 f.: il.: color., tab.. (Série: 444)

Orientadora: Profa. Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa.
Coorientadora: Profa. Dra. Caroline Delpupo Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geoquímica. 2. Geomorfologia. 3. Desertos - Deserto polar. 4. Solos - Criossolos. 5. Rochas sedimentares - Evaporito. I. Costa, Alice Fernanda de Oliveira. II. Souza, Caroline Delpupo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 551.34:550.4

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Juliana Guimarães Ribeiro de Souza

Origem, composição e distribuição dos sais superficiais nas Montanhas Ellsworth, Antártica Ocidental

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Geóloga

Aprovada em 15 de agosto de 2022

Membros da banca

[Doutora] - Alice Fernanda de Oliveira Costa - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Lucas Pereira Leão - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - José João Lopes Leal de Souza - (Universidade Federal de Viçosa)

Alice Fernanda de Oliveira Costa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Alice Fernanda de Oliveira Costa**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/11/2022, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0420302** e o código CRC **703846AC**.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter guiado meu caminho e me sustentado até o fim.

A minha família pelo incentivo constante e por serem sempre os primeiros a acreditar no meu potencial.

À professora Caroline Delpupo por ter sido mais que uma orientadora, pelo aprendizado acadêmico e de vida, e à professora Alice por ter me apoiado neste desafio.

À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Ao Departamento de Geologia por toda experiência acadêmica

Aos amigos, que foram a calma em cada uma das minhas tempestades, em especial Júlia Coimbra, Juliana, Malena, Luxsiene, Gustavo, Felipe e Otávio.

Enfim, a todos os quais em algum momento nossos caminhos se cruzaram nesse tempo ouro-pretano, e que de alguma forma contribuíram para que minha jornada fosse mais leve e cheia de luz.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
1.5.1 Revisão bibliográfica.....	4
1.5.2 Seleção das amostras.....	4
1.5.3 Microanálises em MEV/EDS.....	5
1.5.4 Levantamento e organização dados.....	5
2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.....	7
2.1 O CONTINENTE ANTÁRTICO.....	7
2.2 AS MONTANHAS ELLSWORTH.....	9
2.2.1 Tectônica e História Glacial.....	9
2.2.2 Formas de Relevo.....	10
2.2.3 Solos.....	12
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
3.1 PANORAMA GERAL DA SALINIDADE NA REGIÃO DA GELEIRA UNION.....	16
3.2 COMPOSIÇÃO DE SAIS SUPERFICIAIS.....	23
3.3 DISTRIBUIÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS.....	25
3.4 ORIGEM DOS SAIS SUPERFICIAIS.....	30
4 CONCLUSÃO.....	34

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 -As Montanhas Ellsworth no contexto do Continente Antártico	3
Figura 2.1 - Exemplos de feições de erosão glacial em Charles Peak, Geleira Union.....	11
Figura 2.2 - Mais alguns exemplos de feições glaciais observadas em Edson Hills.....	12
Figura 2.3 - Perfis de solos representativos de Edson Hills, Cadeia Heritage.....	13
Figura 3.1 - Formas de acumulação de sal na região da Geleira Union, Ellsworth Mountains.....	17
Figura 3.2 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura sobre amostra EL23.....	31
Figura 3.3 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura sobre amostra EL7.....	32

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Estágio morfo genético dos sais solúveis dos solos da porção sul das	19
Tabela 3.2 - Composição química dos sais solúveis dos solos da porção sul das	22
Tabela 3.3 - Composição química dos sais solúveis dos solos da porção sul das	25
Tabela 3.4 - Descrição geral, localização e classificação dos perfis de solos da	29
Tabela 3.5 - Dados composicionais da amostra EL23.....	31
Tabela 3.6 - Dados composicionais da amostra EL7.....	32

Resumo

As áreas livres de gelo das Montanhas Ellsworth são classificadas como um dos ambientes mais secos do planeta. A escassa precipitação somada às extremas temperaturas negativas, resultam em uma baixa disponibilidade de água no estado líquido e uma aridez extrema. Essas condições ambientais únicas favorecem a precipitação de sais e sua generalizada acumulação em solos e sedimentos. É importante ressaltar que nesses ambientes a atuação de intemperismo químico está limitada a locais com maior disponibilidade de água líquida, sendo o intemperismo físico o principal agente modificador e formador de paisagem. O objetivo deste trabalho foi determinar a origem, composição e distribuição dos sais superficiais de áreas livres de gelo das Montanhas Ellsworth, Antártica Ocidental, correlacionando propriedades químicas, petrográficas e micromorfológicas com os diferentes estágios morfogenéticos de acumulação das crostas analisadas, além de relacionar a distribuição dos diferentes sais nos diversos substratos, topografia e ambientes da área de estudo. Foi observado que distribuição das acumulações salinas estão intimamente ligadas a ambientes com baixa disponibilidade de água, não presença de líquens e musgos, proteção contra os ventos catabáticos, boa drenagem dos solos, presença de permafrost seco e desenvolvidos sobre a influência de um substrato de mármore. Os dados geoquímicos dos sais solúveis apontam que o cátion dominante é o Na^+ e o ânion dominante o SO_4^{2-} , ambos corroboram com o esperado para um ambiente como o das Montanhas Ellsworth, sem a influência direta de água marinha. Além disso, a geoquímica permitiu afirmar que a provável origem dos cátions e ânions que compõem as acumulações salinas se dá por meio de transporte eólico, aerossóis marinhos e precipitação de neve, como raras exceções como K^+ e Ca^+ advindos dos intemperismos químico e físicos atuantes na litologia local.

Palavras chave: Sais superficiais, deserto polar, Antártica Continental, criossolos, evaporitos, geomorfologia glacial

Abstract

The ice-free areas of the Ellsworth Mountains are classified as one of the driest environments of the planet. The scarce precipitation added to the extreme negative temperatures, result in a low availability of water in the liquid state and extreme aridity. These unique environmental conditions favor the precipitation of salts and their widespread accumulation in soils and sediments. It is important to emphasize that in these environments the action of chemical weathering is limited to places with greater availability of liquid water, with physical weathering being the main modifying and forming agent of the landscape. The purpose of this work was to determine the origin, composition and distribution of surface salts from ice-free areas of the Ellsworth Mountains, West Antarctica, correlating chemical, petrographic and micromorphological properties with the different morphogenetic stages of accumulation of the analyzed crusts, in addition to relating the distribution of different salts in the different substrates, topography and environments of the study area. It was observed that the distribution of saline accumulations is closely linked to environments with low water availability, no presence of lichens and mosses, protection against katabatic winds, good soil drainage, and presence of dry permafrost and developed under the influence of a marble substrate. . The geochemical data of the soluble salts indicate that the dominant cation is Na^+ and the dominant anion is SO_4^{2-} , both of which corroborate what was expected for an environment such as the Ellsworth Mountains, without the direct influence of seawater. In addition, geochemistry allowed us to state that the probable origin of the anions and cations which saline accumulations are made of is through wind transport, marine aerosols and snow precipitation, with rare exceptions such as K^+ Mg^{2+} and Ca^+ arising from chemical and physical weathering acting on local lithology.

Key words: Superficial salts, cold desert, Continental Antártica, cryosols, evaporates, glacial geomorphology

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Regiões áridas sem cursos d'água permanente e com uma taxa de cobertura vegetal menor que 15 % de sua área, onde, em média, a taxa de precipitação anual é menor que 250 mm são classificadas como desertos (Marshak 2012). Cada tipo de deserto oferece características únicas que o diferencia dos demais. Desertos frios podem ser encontrados em altas latitudes onde pouca energia solar chega devido a incidência oblíqua dos raios solares sobre a Terra; em altas altitudes, onde o ar rarefeito não é capaz de absorver calor excessivo; ou próximo a oceanos de águas frias, onde o calor do ar é absorvido pelas águas marinhas (Bockheim 1997).

Ao norte do Círculo Polar Ártico (66°30'N) e ao Sul do Círculo Polar Antártico (66°30'S) se encontram os chamados desertos polares, onde a escassa precipitação somada às extremas temperaturas negativas, resultam em uma baixa disponibilidade de água no estado líquido (French 2007). A extrema aridez nesses ambientes limita a atuação de intemperismo químico a locais com maior disponibilidade de água líquida, sendo o intemperismo físico o principal agente modificador e formador de paisagem. Tal combinação favorece sobremaneira a precipitação de sais e sua generalizada acumulação em solos e sedimentos (Campbell & Claridge 1987).

Claridge & Campbell (1968,1982) afirmam que os solos encontrados na Antártica se assemelham a solos de deserto em outras partes do mundo. Os autores também afirmam que os sais nesses solos e em rochas atuam de duas maneiras distintas no intemperismo – quimicamente e fisicamente. Segundo eles, a cristalização de sais a partir de soluções confinadas em poros e pequenas fendas exerce uma pressão, fraturando-os e expondo-os ao ar (Campbell & Claridge 1987). Esse processo é semelhante ao que ocorre quando a água tem seu volume ampliado ao formar cristais de gelo e exerce perturbação aos grãos de minerais ou fragmentos de rocha (Wellman & Wilson 1965). Wellman & Wilson (1965) consideram que a acumulação de sais depende do aporte (ambiente acumulador) e de pontos de proteção contra vento e a chuva.

Embora o intemperismo físico seja predominante na Antártica, o intemperismo químico também está presente. Por meio deste, íons são liberados dos minerais presentes em rochas, contudo, a extrema aridez e ausência da lixiviação, somadas ao fato de que nesses ambientes de deserto polar a evaporação excede a precipitação, fazem com que se acumulem no solo na forma de sais solúveis em água ou em incrustações em rochas (Campbell & Claridge 1987).

As peculiaridades dos ambientes antárticos, as condições únicas de pedogênese da região e a escassez de estudos sobre acumulações salinas em deserto polar antártico, tanto como lacunas sobre a origem dos sais e como estes afetam a pedogênese, justificam o interesse científico nesta área do conhecimento e tornam essa região uma extensa fonte de conhecimento (Simas 2006; Gjorup 2013).

Sabe-se que as regiões polares são extremamente sensíveis às mudanças climáticas ocorridas ao longo da evolução da Terra. Estudos pedológicos dessas regiões envolvendo feições salinas são de extrema importância para que se possa compreender o funcionamento de ecossistemas, bem como as condições ambientais específicas importantes para o conhecimento climático e pedológico em escala mundial (Souza 2015).

Esse trabalho busca determinar a origem, composição e distribuição dos sais superficiais de áreas livres de gelo das Montanhas Ellsworth, Antártica Ocidental. Além disso, busca-se correlacionar propriedades químicas, petrográficas e micromorfológicas com os diferentes estágios morfogenéticos de acumulação das crostas analisadas. Por fim, pretende-se relacionar a distribuição dos diferentes sais nos diversos substratos, topografia e ambientes da área de estudo.

1.2 LOCALIZAÇÃO

As Montanhas Ellsworth estão localizadas na região central da Antártica Ocidental. Esse acidentado grupo de montanhas se estende 350 km na direção NNW-SSE e possui 80 km de largura (Figura 1.1-a). Como mostra a Figura 1.1-b, a geleira Minnesota ($79^{\circ}04''S$), a qual flui para leste, divide esse grupo em duas cadeias: Cadeia Sentinel (220 km de extensão por 55 de largura), ao norte, e Cadeia Heritage (190 km de extensão por 90 de largura), ao sul estão compreendidas nas longitudes 78° e $87^{\circ}W$ e nas latitudes $88^{\circ}30'$ e $77^{\circ}15'S$ (Denton et al. 1992; Webers et al. 1992). As amostras foram coletadas ao longo das áreas livres de gelo próximas à Geleira Union (Figura 1.1-f). Diversos são os ambientes componentes desta paisagem e alguns deles estão presentes nas Figuras 1-c, d e e.

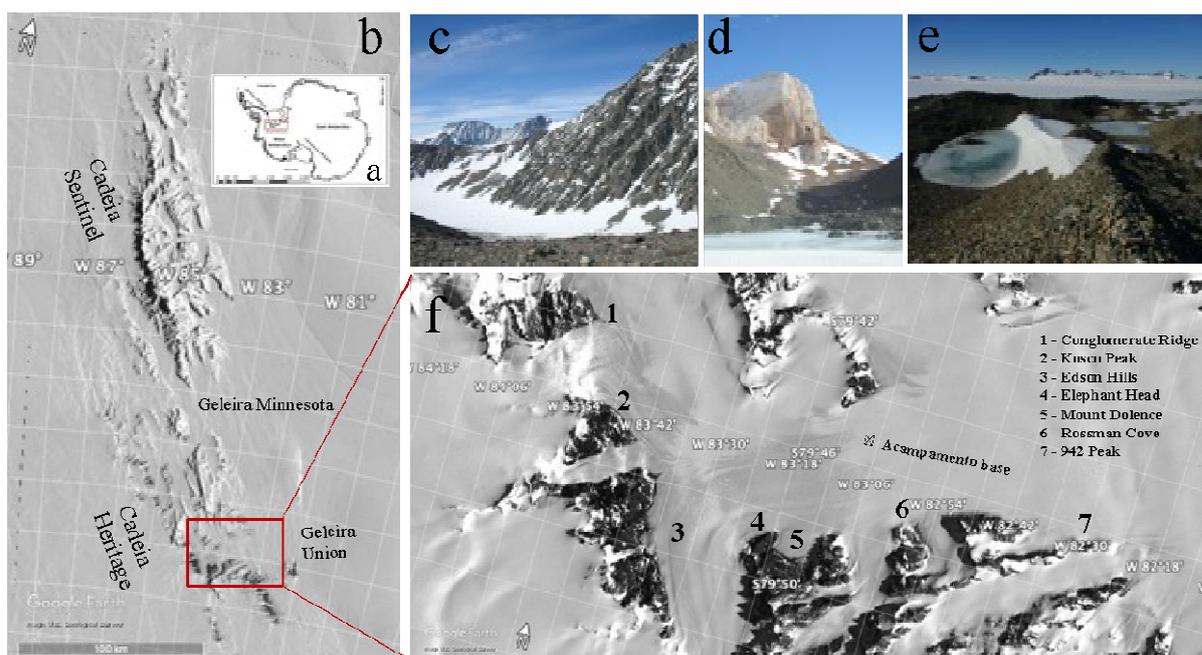


Figura 1.1- As Montanhas Ellsworth no contexto do Continente Antártico (a); as cadeias Sentinel e Heritage Range, e a região da Geleira Union (b). Algumas áreas livres de gelo da Cadeia Heritage (c), Mount Dolence (d) e Elephant Head (e). Localização das áreas livres de gelo analisadas (f).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo primordial deste trabalho foi utilizar da correlação entre as propriedades químicas, petrográficas e micromorfológicas com os diferentes estágios morfogênicos de acumulação salina para que se possa determinar a origem, composição e distribuição dos sais superficiais de áreas livres de gelo das Montanhas de Ellsworth.

1.4 JUSTIFICATIVA

As pesquisas desenvolvidas na Antártica têm sido fundamentais ao compreender toda a dinâmica ambiental e climática do planeta Terra. Os sais superficiais formados nas Montanhas de Ellsworth, devido às condições únicas de formação que o continente Antártico oferece, são importantes indicadores de condições de intemperismo passadas e presentes. A discussão sobre a origem dos sais tem se intensificado nos últimos tempos, entretanto, a bibliografia disponível ainda se encontra bem limitada. Desta forma, estudos sobre a gênese, composição e distribuição destes sais são fundamentais para a compreensão de ambientes de formação e condições paleoclimáticas a nível local

e também, importante para incrementar o conhecimento sobre acumulações salinas a nível mais amplo.

Sendo assim, o presente trabalho é justificado pela necessidade de entendimento dos processos que levam à formação de crostas no deserto polar antártico, já que este ambiente oferece condições climáticas extremamente específicas no que diz respeito às baixas temperaturas, reduzida disponibilidade de água no estado líquido e fortes ventos catabáticos que atuam na região.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os objetivos propostos fossem alcançados, as etapas procedimentais abaixo elencadas foram cumpridas.

1.5.1 Revisão bibliográfica

Este trabalho se estruturou teoricamente a partir de livros-texto do campo das Geociências aliados à literatura especializada em sistemas glaciais e periglaciais pelo mundo. A vasta produção de conhecimento de ecossistemas terrestres da Antártica gerada pelo Núcleo Terrantar servirá de base para as discussões travadas ao longo do texto. Por fim, também foram consultados trabalhos clássicos de caráter exploratório produzidos pelos pesquisadores pioneiros em estudos do continente gelado, como Campbell & Claridge (1987), Webers (1992), Denton (1992), James Bockheim (2015) etc.

Todas as fontes consultadas foram importantes para o nivelamento acerca de temas e conceitos necessários a este estudo, tais como: sistemas desérticos no mundo, desertos polares, sistemas de alteração em ambientes polares, solos criogênicos, ambientes, processos e formas glaciais e periglaciais, litologia e história glacial das Montanhas Ellsworth, entre outros.

Vale ressaltar que a temática escolhida carece de fontes específicas para consulta em função do restrito número de pesquisas desenvolvidas nesses ambientes tão remotos.

1.5.2 Seleção das amostras

As amostras utilizadas neste trabalho foram selecionadas e cedidas pelo banco de solos da Antártica pertencente ao Núcleo Terrantar, da Universidade Federal de Viçosa. Foram analisadas 22 amostras de diversas áreas livres de gelo da região da Geleira Union, Montanhas Ellsworth (Figura 1-f), com a finalidade de compreender a distribuição e as variáveis ambientais envolvidas na acumulação da salinidade na área de estudo. Foram selecionadas amostras representativas de diferentes condições

de drenagem, de cobertura permanente de neve, faces de exposição à radiação solar e a correntes de vento, litologias, forma e natureza do permafrost, organismos, altitude etc.

Foram selecionados dados já gerados sobre a composição química dos sais solúveis dos solos da região além de microanálises preliminares operadas por microscopia eletrônica de varredura das crostas salinas foram resgatados.

1.5.3 Microanálises em MEV/EDS

Foram realizadas análises semiquantitativas pontuais em microscópio eletrônico de varredura (MEV), com detector de retroespalhamento acoplado ao espectrômetro de dispersão de raios (EDS), modelo JSM6510 (Jeol) do Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do Departamento de Geologia da UFOP. As leituras foram feitas usando acelerações de 0,5 a 30 kV. As amostras foram recobertas por uma fina película de grafite para formar uma superfície condutora. Após análise exploratória da lâmina, foram selecionadas áreas de interesse como minerais em diferentes níveis de cristalização e degradação; interface entre acumulações salinas e substratos litológicos diversos etc. Foram analisados os elementos Si, Al, Fe, Mn, K, Ca, S, P, K, Na e Mg, por representarem elementos de interesse para a caracterização de silicatos presentes nas rochas sobre as quais as crostas salinas se formam, além das próprias acumulações salinas.

1.5.4 Levantamento e organização dados

Os dados levantados e gerados foram analisados e organizados de maneira integrada, observando os padrões composicionais das crostas salinas estudadas, sobretudo ao que diz respeito a médias, dispersão em torno das médias, valores máximos e mínimos. Estes dados consistem na morfologia e acumulação do sal, a propriedades químicas dos solos (pH, densidade, capacidade de troca catiônica efetiva , índice de saturação por sódio, carbono orgânico total e condutividade elétrica), concentração de sais solúveis e; descrição geral, localização e classificação dos solos em Ellsworth.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

2.1 O CONTINENTE ANTÁRTICO

A Antártica possui uma área de cerca de 14 milhões de km², é o quinto maior continente do planeta e contém 90 % do gelo do mundo. Esse continente possui a maior altitude média (3.000 m) e nele são registradas as menores temperaturas médias do ar (-40 °C) (Campbell & Claridge 1987; Bockheim & Hall 2020). As baixas temperaturas encontradas nestas regiões polares ocorrem porque estas recebem apenas 15 % do total da radiação solar anual incidente na zona equatorial; e também devido ao incremento médio da altitude da superfície relacionado ao manto de gelo que cobre quase todo o continente (Campbell & Claridge 1987). É também um termorregulador global, devido a sua alta altitude e posição geográfica (Ugolini & Bockheim 2008) e exerce influência nos sistemas atmosférico e criosférico da terra ao dissipar calor (Bockheim & Hall 2002).

Este continente é conhecido por possuir o clima mais frio e seco de todo o mundo, possuindo ambientes extremamente áridos, pois de acordo com Campbell & Claridge (1987), o resultado dessas condições extremas, é a rara ocorrência de água no estado líquido, resultando em uma atmosfera de baixa umidade e pouca precipitação. As temperaturas médias anuais aumentam das regiões costeiras às regiões de maior altitude nas Montanhas no interior do continente (Campbell & Claridge 2004). e a rara precipitação assemelha o continente a outros desertos do mundo. Os ventos antárticos são classificados como ventos catabáticos. Eles ocorrem devido às massas frias de gelo nas altas altitudes (Campbell & Claridge 1987) e se tornam bem fortes ao longo da encosta entre o planalto central e a região costeira antártica. Entretanto, a Antártica Ocidental, por possuir altitudes um pouco menores, também sofre influência das tempestades ciclônicas circumpolares, as quais trazem ventos mais fortes, e tornam um pouco mais comum a precipitação.

De acordo com Bockheim (2014) a Antártica pode ser distribuída em três áreas climáticas distintas:

- i) Península Antártica somada às ilhas antárticas compreende um clima subantártico marítimo com temperaturas anuais entre -2 °C a -4 °C e precipitação de 400 a 700 mm (água equivalente);
- ii) Regiões Costeiras da Antártica Oriental possuem um clima desértico polar com temperaturas anuais variando em média de -10 °C a -12 °C e 200 a 250 mm de precipitação;

- iii) Montanhas do Interior submetidas a uma clima de deserto frio com as menores temperaturas registradas, -20 °C a -35 °C (média anual), e precipitação anual inferior a 50mm, nessas montanhas são encontradas a maior parte das áreas livres de gelo do Continente Antártico.

Nos desertos Antárticos, ocorrem as áreas livres de gelo, que ocupam uma geomorfologia que pode variar das cadeias de montanhas a topografia menores, compreendendo seixos, campos de tálus, solos, areias e dunas, os quais devido a ciclos de congelamento e descongelamento podem adquirir feições com padrões (*patterngrounds*) (Riffenburgh 2007).

A Antártica possui uma área total de 49.500 km² e apenas 0,35 % desta extensão são áreas livres de gelo (Bockheim 2014), as quais estão distribuídas pelas Montanhas Transantárticas (53 %), Península Antártica (20%), MacRobertson Land (11%), Queen Maud Land (7%) e outras áreas dispersas (9%). A história glacial do continente é a responsável pela ocorrência esporádica dessas áreas (Campbell &Claridge 2004).

Nas Montanhas Transantárticas essas áreas podem ocorrer quando geleiras ao fluírem do Manto de Gelo Antártico Oriental (4000 m de elevação) ao Manto de Gelo Antártico Ocidental (1500 m) escavaram vales nestas montanhas e, somado às flutuações dos níveis de gelo ao longo do tempo, expõem esses substratos (Campbell &Claridge 2004), deixando-os suscetíveis a formas de intemperismo físico e químico, e a conseqüente pedogênese. Um processo similar ocorre nas Montanhas Ellsworth. Campbell &Claridge (1987) afirmam que a topografia foi primeiramente moldada, em um momento pré-glacial, por uma junção entre rios e a litologia local, resultando em vales de padrão dendrítico. Posteriormente, com a glaciação, essas formas de relevo foram preenchidas e retrabalhadas pelas geleiras, acentuando os cumes e aprofundando os vales. Com consecutivo degelo e retração do manto gelo, formaram áreas pontuais livres de gelo neste conjunto montanhoso, que atualmente somam 2.095 km² (Bockheim&Schaefer 2015). De acordo com Dana et al (1998) essas áreas recebem uma quantidade ínfima de radiação solar durante todo o ano e a maior parte da precipitação nestas áreas acontece na forma de neve com pouca ou nenhuma umidade, da qual uma pequena parte pode se infiltrar no solo, ou em sua maioria, ser levada pelos ventos ou sublimada (Campbell &Claridge 2004).

2.2 AS MONTANHAS ELLSWORTH

As Montanhas de Ellsworth se estendem por 350 km em uma direção NNW-SSE, são compostas por dois segmentos, a Cadeia Sentinel localizada ao norte e a Cadeia Heritage localizada ao sul; e são separadas pela Geleira Minnesota que flui entre elas em direção ao leste (Denton et al. 1992). A sucessão estratigráfica possui mais de 13.000 m de espessura, data do Cambriano ao Permiano e é separada entre o Grupo Heritage e o Grupo Crashsite. Em menos de um período geológico ocorreu a deposição de mais da metade deste pacote estratigráfico (Webers et al. 1992). Abaixo serão descritas as duas principais unidades geológicas que compõem a Geologia local.

A Geologia das Montanhas Ellsworth pode ser entendida a partir das duas principais unidades cronoestratigráficas, descrita por Webers et al. (1992): Grupo Heritage e Grupo Crashsite.

O Grupo Heritage foi depositado entre o Cambriano médio e o e o Cambriano superior As rochas estão expostas majoritariamente na Cadeia Heritage, possuindo uma pequena área na Cadeia Sentinel. Sua sucessão estratigráfica de cerca de 7.500 m é composta basicamente por rochas sedimentares clásticas (xisto negro deltaico, com altos teores de matéria orgânica; e sedimentos marinhos) que foram depositadas em um contexto de rápida subsidência de bacia bordejada por rochas carbonáticas e um moderado relevo de áreas-fonte de quartzitos (Webers *et al.* 1992). Juntamente com o fim da deposição deste grupo, a atividade vulcânica intensa também cessou pelo resto do Paleozoico. Uma subsidência mais branda resultou na deposição do grupo sobreposto: O Grupo Crashsite.

O Grupo Crashsite foi depositado entre o Cambriano Superior e o Devoniano e consiste em uma sequência de 3.000 m que remete a um ambiente de águas raras, composta majoritariamente por rochas de origem marinha (quartzito, argilito, conglomerado, calcário e rochas ígneas básicas). Ao topo, foi depositada a Formação Conglomerado Branco (Permo-Carbonífero) e Formação Polarstar (Permiano), de origem glaciogênica (Sporli 1992). Este grupo possui a maior área exposta de toda Ellsworth (Webers et al. 1992) e durante o Eojurássico essa sequência foi metamorfizada (Craddock 1969).

2.2.1 Tectônica e História Glacial

A deformação ocorrida nas rochas das Montanhas Ellsworth é defendida por Webers *et al.* (1992) como um evento orogenético único, do Mesozoico Inferior e que outros eventos deformacionais datados anteriormente exerceram pouca influência no desenvolvimento geral das Montanhas. Webers *et al.* (1992) também especulam que a elevação (6.100 m) ocorreu entre o Triássico Superior e o Paleógeno e pode estar relacionada a translação e rotação das Montanhas Ellsworth, mas ainda há incertezas nessa interpretação.

Rutford (1972a, 1972b) e Rutford *et al.* (1980, 1982) descrevem a geomorfologia pós-tectônica das Montanhas Ellsworth em 4 eventos:

- 1) Erosão fluvial tendo como resultado o desenvolvimento dos vales principais presentes até o recente;
- 2) Começo da glaciação nos vales que configura até hoje o processo dominante de desenvolvimento de paisagem nas porções mais altas das Montanhas;
- 3) Glaciação em escala continental tendo como resultado a cobertura das partes mais baixas da montanha por gelo continental e;
- 4) Rebaixamento do nível de gelo continental em 300 m devido a uma deglaciação parcial.

Os autores Campbell &Claridge (1987) definem 3 manifestações glaciais principais ocorridas nas Montanhas Ellsworth. A primeira seria uma fase de glaciação alpina, quando geleiras de base úmida tinham um poder erosivo muito eficiente intensificado pelas temperaturas mais moderadas. Em seguida, ocorreu uma glaciação continental, cobrindo praticamente toda a área, restando apenas alguns picos expostos como *nunataks*. Esta fase é conhecida como o Último Máximo Glacial e as geleiras de base seca modificaram muito pouco as formas esculpidas pela glaciação anterior. Por fim, ocorreu um período de deglaciação, resultado das oscilações do Manto de Gelo Antártico Ocidental e responsável por expor áreas antes cobertas pelo gelo (Rutford *et al.* 1980).

2.2.2 Formas de Relevo

A atual geomorfologia das Montanhas Ellsworth é o resultado de sucessivos eventos glaciais e não glaciais ocorridos no tempo geológico (Campbell & Claridge 1987). Denton *et al.* (1992) identificaram duas feições principais de erosão glacial nas Montanhas Ellsworth. As primeiras consistem em montanhas expostas - como *horns*, aretês e *spurs* - formas típicas de erosão alpina glacial (Figura 2.1-a). A segunda é chamada de linha de corte (*trimline*) que separa cumes e cristas alpinos mais suaves, estriados e de menor altitude de cumes e cristas mais elevados, serrilhados e sem estrias (Figura 2.1-b). Essas linhas foram interpretadas pelos autores como um paleolimito de gelo sobreposto a topografia alpina pré-existente pois, dentre outras evidências pode-se ressaltar que, acima dessas linhas, não são encontradas impressões de movimento de gelo e abaixo são encontrados depósitos glaciais e blocos erráticos.

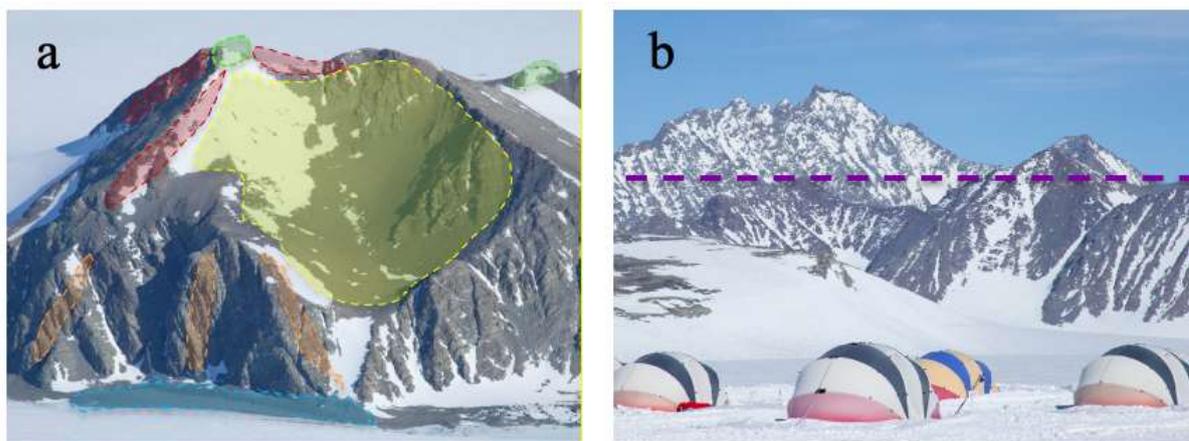


Figura 2.1- Exemplos de feições de erosão glacial em Charles Peak, Geleira Union: (a) *horns* (pontilhado em verde); aretês (pontilhado em vermelha); *spurs* (pontilhado em laranja); circo glacial (pontilhado em amarelo); Moraina lateral (pontilhado em azul). Pontilhado em roxo exemplificando a *trimline* em Monte Rossman)(b).

A Cadeia Heritage possui 190 km de extensão e 90 km de largura, está orientada a NNW-SSE, e sua topografia dominante consiste em morfologias alpinas glaciais clássicas (Denton *et al.* 1992). A orientação dos ventos catabáticos dessa região gera uma acumulação de neve nos circos e encostas na face oeste da cadeia (Rutford 1969), concentrando as áreas livres de gelo resultantes da ablação destes ventos, principalmente na face leste.

A Geleira Union possui uma área total de 2561 km² e 86 km de comprimento (Rivera *et al.* 2010). Esta geleira é umas das três principais geleiras que compõem a drenagem interna de gelo da Cadeia Heritage (Denton *et al.* 1992), flui na direção ENE e é alimentada por diversos tributários de circos internos e bases de acumulação de neve entre os cumes.

Um trabalho realizado por Delpupo *et al.* (2017) identificou três conjuntos de formas de relevo comuns na área da Geleira Union. Formas periglaciais, como encostas de manto de detritos levemente rastejados, encostas de mantos de detritos íngremes, solos com padrões (*patterned grounds*) e *termokarst*; formas glaciais, como morainas *hummocky*, morainas laterais, *horns*, aretes; e formas não glaciais, como encostas de seixos e depósitos de tálus (Figura 2.2). Costa & Vieira (2017) que também realizaram trabalhos sobre as formas de relevo na Geleira Union afirmam que essas formas de relevo foram afetadas pelas ações dos ventos catabáticos comuns nesta região, e também podem ter tido o material detrítico retrabalhado por intemperismo, além de refletirem os processos de deglaciação e variações sofridos pelo Manto de Gelo Antártico Ocidental.

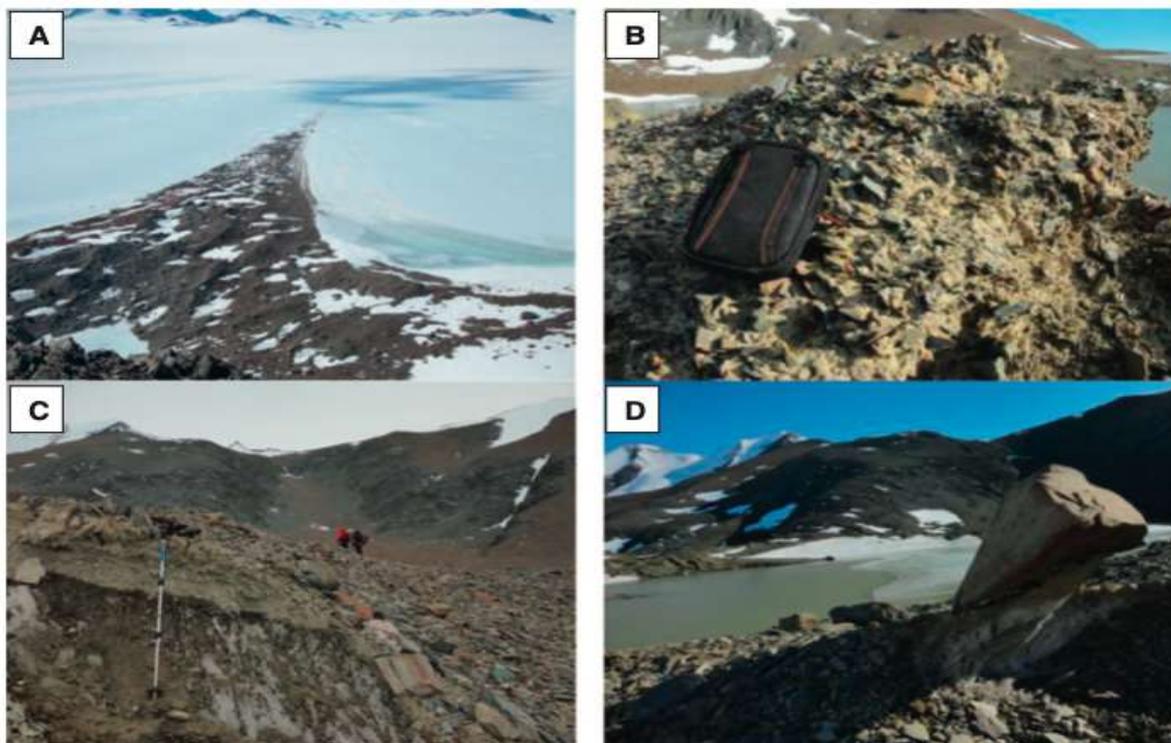


Figura 2.2- Mais alguns exemplos de feições glaciais observadas em Edson Hills, região da Geleira Union: moraina *hummocky* (A); feições de crioturbação (B); feições de *termokast* (C e D). Fonte: Delpupoet *al.* (2017)

2.2.3 Solos

A formação de solos na Antártica está restrita a menos de 0,35 % do continente sob condições de frio e aridez extrema. Principalmente os solos que ocorrem nas áreas livres de gelo da Antártica Continental, podem ser designados como solos de deserto polar (Bockheim 1997). De acordo com Campbell & Claridge (1987), as Montanhas Ellsworth estão inseridas na zona de permafrost contínuo de espessura desconhecida.

De forma geral, os solos da Cadeia Heritage, porção sul das Montanhas Ellsworth, são pedregosos (esqueléticos/psamíticos), rasos, pouco desenvolvidos, com baixos valores de cromas, podendo conter acumulação de sal dependendo da drenagem local, apresentam típicas, porém, discretas feições de crioturbação e até mesmo pode-se encontrar líquens em locais que oferecem proteção à ação dos ventos (como guirlandas de pedra), possuem maior disponibilidade de água, a qual favorece a lixiviação e interfere na acumulação de sais (Figura 2.3 e Delpupoet *al.* 2017). A autora também evidencia que as condições de drenagem desses solos dependem da posição na paisagem e natureza do permafrost, o qual normalmente não ultrapassa a profundidade de 45 cm. Em áreas de fundo de vale ou em morainas, o permafrost é cimentado por gelo, onde a livre drenagem é impedida. Já o permafrost seco, bem drenado, é encontrado em porções mais elevadas. Por fim, como esperado

de solos desenvolvidos em sob frio severo e aridez extrema, possuem horizontes pouco desenvolvidos e pouca diferenciação do material de origem.

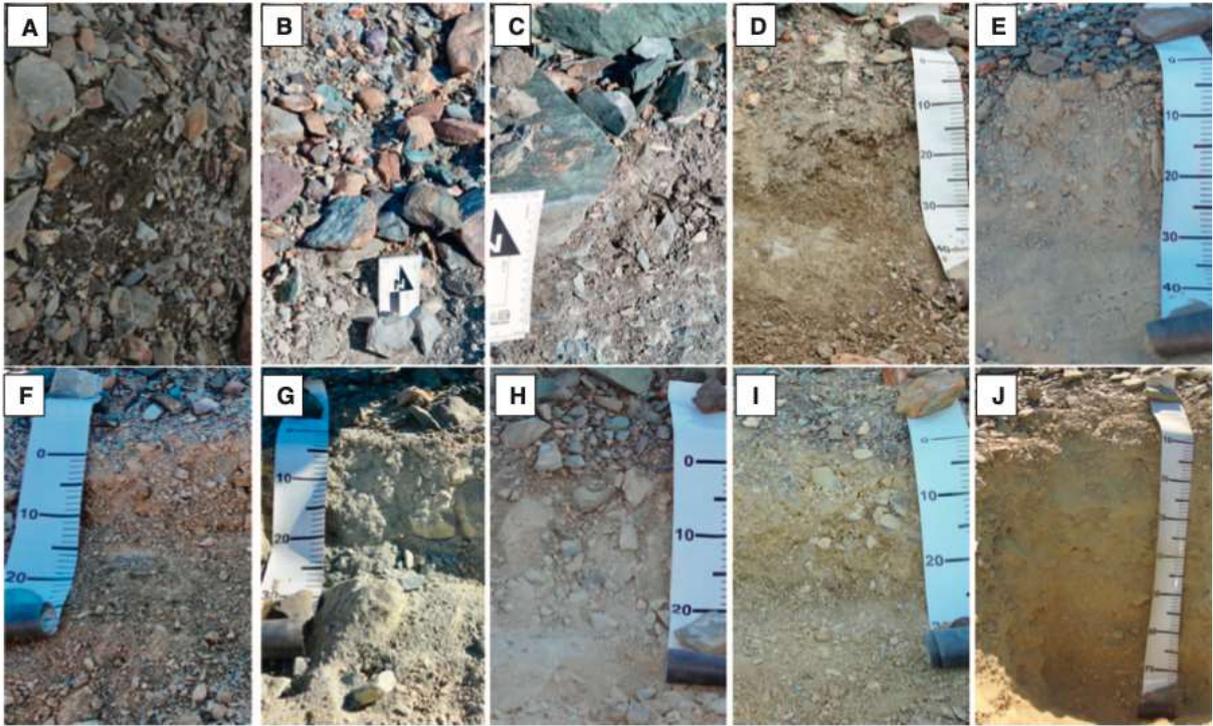


Figura 2.3- Perfis de solos representativos de Edson Hills, Cadeia Heritage. Fonte: Delpupoet *al.* (2017)

As análises químicas realizadas por Souza (2015) mostram que os solos das Montanhas Ellsworth são moderadamente ácido e fortemente alcalinos (pH entre 5,49 e 9,23), o que ressalta o baixo intemperismo químico limitado pelo clima; são eutróficos (saturação por bases entre 51,9 e 97,1 %), têm baixa capacidade de troca catiônica (entre 1,0 a 9,9 cmol/dm³), além de baixo teor de matéria orgânica.

A formação dos solos das Montanhas de Ellsworth é controlada por principalmente por três parâmetros principais: material parental, topografia e idade do solo (Bockheim & Schaefer 2015), sendo que a relação genética entre o solo e o substrato é extremamente forte devido às condições climáticas de deserto polar (Campbell & Claridge 1987).

Os quartzitos encontrados na Cadeia Heritage além de representarem a rocha metamórfica dominante da área são as rochas mais resistentes das Montanhas Ellsworth. Os solos desenvolvidos sobre essa litologia são alcalinos (pH de 7,66 que aumenta com a profundidade), possuem baixo teor de carbono orgânico e as variações da concentração de P correspondem as impurezas dos grãos de quartzo (Bockheim & Schaefer 2015). Possuem cores pálidas, coerentes com o material de origem rico

em quartzo e micas e o baixo teor de acumulação de matéria orgânica (Souza 2015). Bockheim&Schaefer(2015) mostram que a profundidade média é de 15 cm em altas elevações e de 30 cm em elevações menores. Nas altas altitudes, encontra-se um maior teor de silte e areia, comportamento atribuído a depósitos eólicos, e as concentrações de argila são baixas em todas as elevações. Entretanto, em baixas elevações, propriedade dos solos como: condutividade elétrica, bases trocáveis (Ca, Na, Mg e K), capacidade de troca catiônica; possuem menores teores devido às variações no input atmosférico e de intemperismo.

Os solos sobre filitos e rochas metavulcânicas básicas possuem cores mais amarelo-acinzentadas, devido ao ferro livre, produto da oxidação de sulfetos do material vulcânico de origem. Entretanto, esse processo de oxidação é incapaz de rebaixar consideravelmente o pH do solo e impulsionar um intemperismo químico (Souza 2015).

Solos desenvolvidos sobre calcários/brechas possuem coloração pálida a avermelhada roseada devido às hematitas cimentantes presentes no material carbonático de origem (Souza 2015). O teor de argila também é baixo e o de silte aumenta conforme a altura da sequência. A ação do intemperismo físico sobre o calcário gera uma significativa quantidade de areia grossa, resultando em um solo pedregoso. Esses solos também são alcalinos e apresentando baixo teor de carbono orgânico, mas possuem baixas concentrações de Ca, Mg e K (justificado pela pouca presença de mica em calcários e mármore). Valores de CTC e CE também baixos se comparados aos desenvolvidos sobre quartzitos. A característica principal desses solos é o baixo teor de Ca livre, o que indica que essa litologia foi pouco intemperizada quimicamente (Bockheim&Schaefer 2015).

Em relação ao material parental, as análises de Souza (2015) mostram que em solos com predominância de SiO_2 seguidos por Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O possuem relação genética com o quartzo, feldspato potássico e mica do material quartzítico de origem. Já os solos com predominância de CaO provêm de um material de origem carbonática.

Bockheim&Schaefer (2015) de acordo com Denton *et al.* (1992) identificaram três idades para os tipos de solos encontrados dependendo do grau de intemperismo. Solos de estágio de intemperismo 1, que remetem à deriva de gelo do Holoceno; solos de estágio de intemperismo 3 que remete às características de Ellsworth no Último Máximo Glacial; e a “janelas” de derivas mais antigas.

Souza (2015) propôs três condições de formação de estrutura do solo em Ellsworth:

- i) solos sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem severos e que também acumulam sal (agente cimentante), estes solos possuem desenvolvimento fraco a moderado e horizonte superficial com blocos angulares

- ii) solos que ou apresentam ciclos de umedecimento e secagem ou acumulam sal, os quais os horizontes superficiais possuem estrutura maciça;
- iii) horizontes que além de não acumularem sal, também não possuem umidade suficiente, não formando estrutura tendo suas partículas em forma de grãos simples. Esses ciclos de umedecimento e secagem necessários para as distinções de solos apresentadas acima, possuem correlação aos solos com permafrost cimentado por gelo.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PANORAMA GERAL DA SALINIDADE NA REGIÃO DA GELEIRA UNION

Foram selecionados 22 perfis de solo do Banco de Solos do Núcleo Terrantar (Souza 2015) coletados na região da Geleira Union, Montanhas Ellsworth, a fim de se analisar as origens, composição e distribuição da salinidade na região. Foram analisadas propriedades morfológicas, físicas e químicas de solos e crostas salinas do estudo realizado, com foco na salinidade.

Devido às condições de extremo frio e aridez severa, as Montanhas Ellsworth demonstram uma enorme pré-disposição em acumular sal. Embora o fundo dos vales glaciais preenchidos por geleira de gelo azul apresente uma importante zona de ablação (derretimento do gelo), quando em contato com as áreas livres de gelo, as demais áreas elevadas (vertentes) dispõem de pouquíssima oferta de água líquida (Delpupo *et al.* 2017). A maior ou menor competência em acumular sal depende eminentemente das condições de drenagem local e da proteção contra os fortes ventos presentes na região.

A região da Geleira Union acumula sal de diversas formas (Figura 3.1). Não é incomum a presença de poças congeladas saturadas em sal (Figura 3.1-a,d). É possível identificar ainda a formação de crostas sobre fragmentos de rochas (Figura 3.1-c,f), abaixo de clastos assentados nas superfícies do solo, pulverizados na superfície dos solos (Figura 3.1-e), dispersos no perfil ou mesmo, formando um horizonte fracamente cimentado por sal ((Figura 3.1-b, *saltpan*). A depender da forma de acumulação de sal é possível hierarquizar os solos entre si, seguindo o que Bockheim (1990) e Campbell &Claridge (1987) chamam de *Estágio Morfogenético de Sal* (Tabela 3.1).

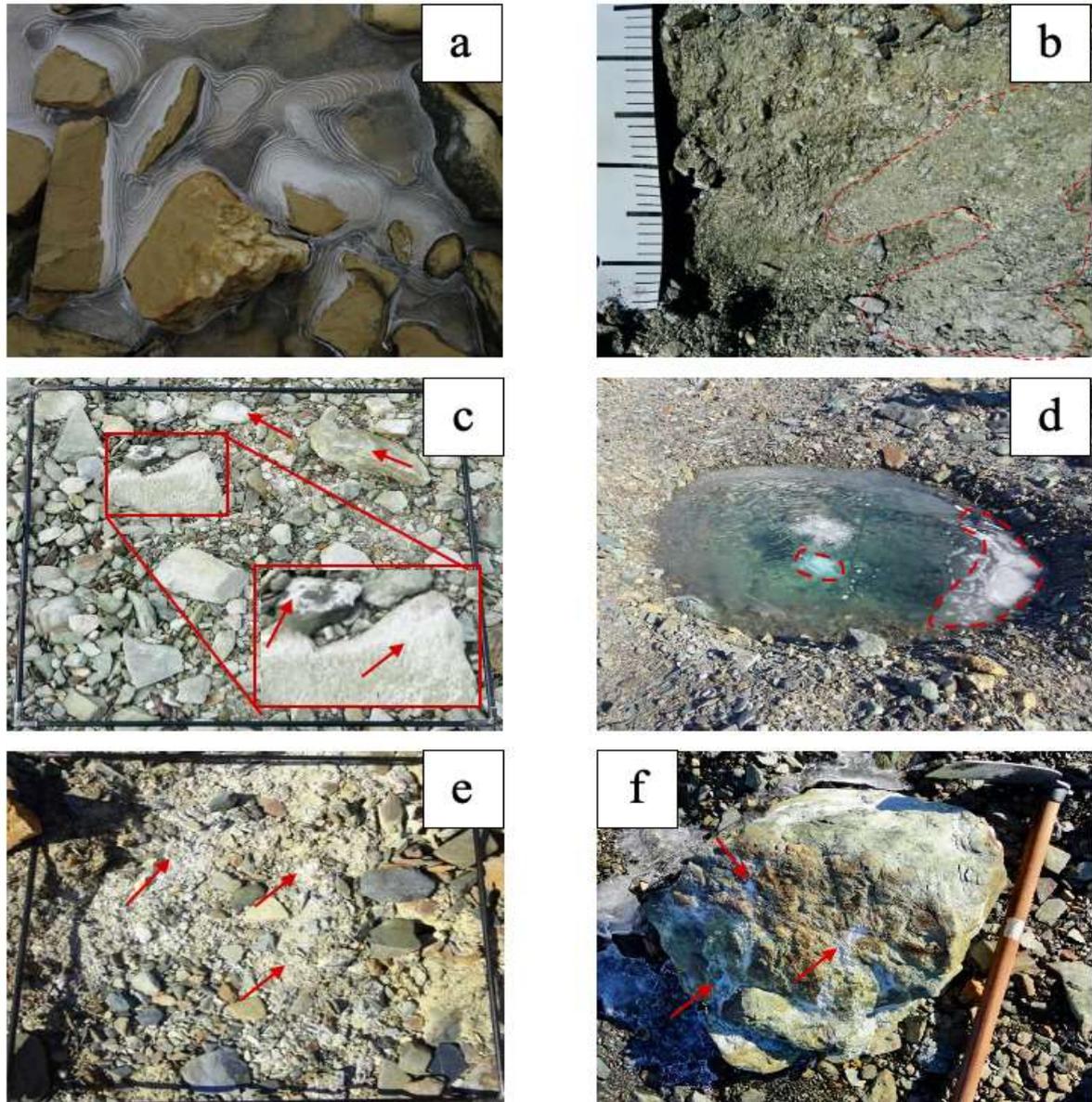


Figura 3.1- Formas de acumulação de sal na região da Geleira Union, Ellsworth Mountains: poças salinas congeladas em Edson Hills (a); horizonte fracamente cimentado por sal em Conglomerade Ridge (b); setas indicando crostas salinas sobre rochas em RossmanCove (c); poça congelada com precipitação de sais ao fundo e bordas Conglomerade Ridge (b); (d); seta indicando acumulação de sal sobre a superfície do solo em Edson Hills (e); e setas indicando crostas salinas sobre rocha em KoscoPeak (f). Fonte: Fotos cedidas por Caroline Delpupo.

Tabela 3.1 Estágio morfogenético dos sais solúveis dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth,

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Local	Morfologia de acumulação do Sal	Estágio de Sal ¹
EL1	Cnz	0-6	Mount Dolence	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	2
EL1	Cnff1	6-12			
EL1	Cnff2	12-20			
EL2	Cn1	0-6	Mount Dolence	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL2	Cn2	6-20			
EL2	Cnff	20-25			
EL3	Cnf1	0-10	Mount Dolence	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	2
EL3	Cnf2	10-30			
EL4	Cox	0-6	Elephant Head	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL4	Coxz	6-15			
EL4	Coxffz	15-22			
EL5	Cox	0-5	Elephant Head	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL5	Coxff1	5-10			
EL5	Coxff2	10-15			
EL6	Cn	0-10	Elephant Head	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL6	Cnff	10-30			
EL7	Cnfjj1	0-5	942 Peak	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	2
EL7	Cnfjj2	5-10			
EL8	Cnfjj1	0-8	942 Peak	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	2
EL8	Cnfjj2	10-15			
EL15	Coxfz1	0-5	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL15	Coxfz2	5-20			
EL17	Coxfk1	0-5/15	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL17	Coxfk2	5/15-30			
EL18	Coxz	0-5	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL18	Coxfz	5-15			
EL19	Coxz	0-8/10	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL19	Cffkoxz	8/10-20			

Tabela 3.1 Estágio morfogenético dos sais solúveis dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Continuação.

Perfil	Horizonte	Profundidade (cm)	Local	Morfologia de acumulação do Sal	Estágio de Sal ¹
EL20	Cox1	0-10	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL20	Cox2	10-20			
EL21	Cfjjo	0-15	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL21	Cfox	15-40			
EL22	Coxjjkz	0-20	Edson Hills	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL22	Coxffkz1	20-40			
EL22	Coxffkz2	40-60+			
EL16	Cnf	0-5	RossmanCove	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL16	Cnfff	5-30			
EL23	Cnjj1	0-5/10	RossmanCove	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL23	Cnjj2	5/10-30			
EL23	Cnfjj	30-40			
EL24	Cnjj1	0-10	RossmanCove	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL24	Cnjj2	10-25			
EL24	Cnfjj	25-30			
EL25	Coxz	0-25	KoscoPeak	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL25	Coxffkz	25-60	KoscoPeak		
EL26	Coxfjj	15/20-25	KoscoPeak	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas.	2
EL27	Cn	0-10	Conglomerate Ridge	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL27	Coxff	10-20			
EL28	Cnmn	0-5	Conglomerate Ridge	Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil; horizonte fracamente cimentado por sal.	5
EL28	Cn	5-10			

¹Classificação segundo Bockheim (1990).

Os solos coletados no Monte Dolence (EL1, EL2 e EL3) apresentaram níveis de acumulação de sal mais tímidos, restringindo-se a raras crostas sobre rochas e abaixo delas, sendo classificada no estágio de sal 2 (Bockheim 1990). Por conta disso, os valores de condutividade elétrica (CE) no perfil deste solo foram muito baixos (maiores que 0,8 dS/m³ e menores que 4,0 8 dS/m³), assim como os índices de saturação por sódio (ISNa)(maiores que 3,61% e menores que 11,49%)(Tabela 3.2).

Os perfis EL5 (Elephant Head), EL20 (Edson Hills) e EL16 (RossmanCove) enquadraram-se no estágio de sal 3, apresentando indício de moderada acumulação salina, comum na superfície das rochas, abaixo de clastos e na superfície do solo (Bockheim 1990). Também os valores de CE e ISNa dentro do perfil mostraram-se muito baixos, com um ligeiro aumento nos horizontes superficiais, não suficiente para classificá-los como salinos (SoilSurvey Staff 2010).

Os perfis EL15 (Edson Hills) e EL25 (KoscoPeak) formam o terceiro grupo de solos que se enquadram no estágio de sal 4 (Bockheim, 1990). Nesses perfis, a acumulação de sal se deu em crostas salinas comuns, abaixo de fragmentos de rocha, na superfície do solo e em manchas dispersas ao longo do perfil. De forma coerente, os valores de CE mostraram-se sensivelmente maiores nesses perfis sendo que o EL15 apresentou inclusive o caráter salino (SoilSurvey Staff 2010). Também o ISNa foi superior nesses solos, não suficientes para caracterizarem horizontes sódico (SoilSurvey Staff 2010).

O perfil EL28 (Conglomerade Ridge) foi classificado no estágio 5 de sal, pois apresenta além da acumulação de sal em crostas sobre rochas, abaixo de clastos, na superfície do solo e dispersos no perfil (Tabela 6), apresentou um horizonte fracamente cimentado por sal (Bockheim 1990). Os valores de CE não foram muito elevados, entretanto o ISNa do horizonte superficial do solo confirmou a grande acumulação de sal, notadamente de sódio.

Tabela 3.2- Propriedades químicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth

Horizonte	Profundidade (cm)	pH	p mg/dm ³	t ¹	ISNa ²	COT ³ dag/kg	CE ⁴ dS/m ³
EL1 Mount Dolence-Lithic Anhyorthel							
Cnz	0-6	8,18	273,00	2,13	10,08	0,17	4,00
Cnff1	6-12	8,59	209,60	1,65	4,82	0,70	1,20
Cnff2	12-20	8,70	268,90	1,57	5,34	0,00	1,00
EL2 Mount Dolence-Lithic Anhyorthel							
Cn1	0-6	8,76	117,20	2,02	11,49	0,34	1,30
Cn2	6-20	8,89	102,50	1,86	5,21	0,17	1,00
Cnff	20-25	8,83	30,30	1,60	3,61	0,00	0,80
EL3 Mount Dolence-Lithic Haplorthel							
Cnf1	0-10	8,95	37,90	1,69	4,19	0,00	1,10
Cnf2	10-30	9,09	28,70	1,50	4,14	0,00	1,00
EL4 Elephant Head-Lithic Anhyorthel							
Cox	0-6	8,72	0,80	1,83	12,69	0,17	3,10
Coxz	6-15	8,38	0,30	3,89	12,69	0,17	8,60
Coxffz	15-22	8,17	0,20	6,48	10,24	0,34	8,60
EL5 Elephant Head-Lithic Anhyorthel							
Cox	0-5	9,01	0,40	1,51	5,27	0,34	0,70
Coxff1	5-10	8,98	0,30	1,58	5,04	0,34	0,80
Coxff2	10-15	8,82	0,30	1,58	5,04	0,34	2,00
EL6 Elephant Head-Lithic Anhyorthel							
Cn	0-10	8,69	0,20	1,32	4,38	0,34	1,00
Cnff	10-30	8,97	0,20	1,41	5,64	0,34	1,20
EL7 942 Peak-LithicHaploturbel							
Cnfjj1	0-5	8,20	144,60	1,15	1,63	0,52	0,20
Cnfjj2	5-10	7,06	166,30	1,33	3,04	0,34	0,60
EL8 942 Peak-LithicHaploturbel							
Cnfjj1	0-8	6,54	181,40	1,23	5,05	0,52	0,60
Cnfjj2	10-15	6,89	343,50	1,00	4,07	0,17	0,40
EL15 Edson Hills-Typic Haploturbel							
Coxfz1	0-5	7,52	59,2	5,29	2,51	0,17	6,7
Coxfz2	5-20	8,39	95,6	4,86	8,45	0,34	4,8
EL17 Edson Hills-Typic Haploturbel							
Coxfk1	0-5/15	7,78	82,70	9,60	12,12	0,34	14,49
Coxfk2	5/15-30	9,23	10,90	7,67	11,44	0,17	11,92
EL18 Edson Hills-Typic Haploturbel							
Coxz	0-5	9,03	114,50	8,82	9,90	0,49	7,61
Coxfz	5-15	8,06	97,50	7,27	10,81	0,34	6,95

¹Capacidade de Troca catiônica efetiva; ²Índice de saturação por sódio; ³Carbono orgânico total; ⁴Condutividade elétrica.

Tabela 3.2.Continuação- Propriedades químicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth

Horizonte	Profundidade (cm)	pH	p mg/dm ³	t ²	ISNa ⁵	COT ⁶ dag/kg	CE ⁷ dS/m ³
EL19 Edson Hills-Lithic Anhyorthel							
Coxz	0-8/10	7,80	1109,70	5,23	4,70	0,17	3,52
Cffkoxz	8/10-20	8,17	216,80	9,51	2,31	0,17	9,01
EL20 Edson Hills-Lithic Anhyorthel							
Cox1	0-10	8,19	76,00	2,64	5,04	0,13	1,75
Cox2	10-20	8,16	311,70	3,24	8,52	0,13	2,92
EL21 Edson Hills-Typic Haploturbel							
Cfjiox	0-15	8,60	71,80	5,39	14,04	0,17	7,09
Cfox	15-40	5,94	73,00	4,33	10,97	0,17	4,28
EL22 Edson Hills-Typic Anhyorthel							
Coxjjkz	0-20	8,60	107,80	8,36	3,72	0,49	6,36
Coxffkz1	20-40	8,58	101,20	7,14	4,05	0,34	4,42
Coxffkz2	40-60+	8,57	120,20	6,13	6,62	0,49	3,91
EL16 Rossman Cove-Typic Haploturbel							
Cnf	0-5	8,51	127,90	1,80	5,00	0,52	1,10
Cnfff	5-30	6,44	337,50	1,48	4,00	0,17	1,00
EL23 Rossman Cove-Typic Haploturbel							
Cnjj1	0-5/10	8,18	206,10	1,61	12,04	0,52	1,90
Cnjj2	5/10-30	8,87	347,60	1,32	5,83	0,17	0,30
Cnfjj	30-40	8,70	373,30	1,08	5,92	0,17	0,20
EL24 Rossman Cove-Typic Haploturbel							
Cnjj1	0-10	8,71	322,70	1,99	9,31	0,34	3,03
Cnjj2	10-25	8,58	219,00	1,29	3,94	0,17	1,03
Cnfjj	25-30	8,89	277,30	1,32	5,17	0,00	0,67
EL25 Kosco Peak-Calcic Anhyorthel							
Coxz	0-25	6,77	23,90	3,36	10,14	17,00	4,87
Coxffkz	25-60	8,59	29,40	9,90	7,29	0,34	14,72
EL26 Kosco Peak-Typic Haploturbel							
Coxfjj	15/20-25	8,99	51,10	2,55	10,32	0,34	2,55
EL27 Conglomerate Ridge-Lithic Anhyorthel							
Cn	0-10	8,76	25,60	3,01	6,01	0,17	1,65
Coxff	10-20	8,87	10,30	5,09	3,21	0,34	1,00
EL28 Conglomerate Ridge-Sodic Anhyorthel							
Cnmn	0-5	8,96	26,30	2,84	16,43	0,34	2,50

Cn	5-10	8,70	24,20	2,49	10,04	0,17	3,08
----	------	------	-------	------	-------	------	------

3.2 COMPOSIÇÃO DE SAIS SUPERFICIAIS

A concentração das formas catiônicas e aniônicas de elementos maiores solúveis no solo revela valiosas informações acerca da composição da salinidade (Richards 1954). Apesar da heterogeneidade de litologias que representam materiais de origem dos solos das áreas livres de gelo da região da Geleira Union, os resultados de sais solúveis demonstram uma provável predominância dos sais sulfatos de cálcio e sódio. Na sequência, é possível observar a contribuição de nitratos e cloretos para a salinidade local.

Os quatro cátions solúveis analisados apresentaram comportamentos diferentes em relação a cada perfil amostrado. O cátion K^+ possui teores baixos ou nulos em praticamente todos os perfis, exceto em EL1 (Mount Dolence) e EL28 (Conglomerate Ridge), mostrando uma maior ação do intemperismo químico, sendo este uma importante fonte de K^+ e Ca^{2+} de acordo com Toner (2013). O Na^+ é o cátion com maior teor médio (84,19 mg/L), sendo que nos perfis EL1, EL15 (Edson Hills), EL16 (RossmanCove), EL20 (Edson Hills) e EL28 (Conglomerate Ridge) são encontradas suas maiores concentrações, podendo observar um aumento considerável nos horizontes subsuperficiais de EL15, EL20 e EL16 (Tabela 3.3). Este comportamento mostra uma maior mobilidade deste cátion e, como afirmam Gore et al. (1996), o Na^+ é o cátion mais abundante em desertos polares, geralmente compondo os minerais Halita e Thernadita, de provável origem marinha e sendo depositados por meio de transporte eólico ou de aerossóis marinhos.

Tabela 3.3. Composição química dos sais solúveis dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil/ Horizonte		Sais Solúveis ¹						
Prof. (cm)	Local	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
mg/L								
EL1 Cnz	Mount Dolence	95,70	239,17	35,90	4,00	118,58	28,48	65,55
EL1 Cnff1	Mount Dolence	28,40	64,28	34,20	3,50	5,82	33,75	54,35
EL1 Cnff2	Mount Dolence	7,50	32,85	36,00	2,90	4,06	30,57	51,16
EL5 AC1 0-5	Elephant Head	0	32,89	65,70	3,50	25,30	41,36	70,55
EL5 C2 5-10	Elephant Head	0	25,44	65,90	3,70	13,59	40,42	78,99
EL5 C3 10-15	Elephant Head	0	28,39	71,00	4,50	10,17	50,31	98,46
EL15 C1 0-5	Edson Hills	0	44,85	63,40	4,40	12,64	35,74	128,38
EL15 C2 5-20	Edson Hills	0	148,5	40,10	13,80	56,46	52,68	224,76
EL20 C1 0-10	Edson Hills	0	29,98	72,00	2,50	10,22	38,37	120,14
EL20 C2 10-20	Edson Hills	0	86,78	56,00	3,90	17,9	40,08	82,46
EL16 C1 0-5	RossmnCove	0	40,40	54,70	2,10	12,79	49,41	71,49
EL16 C2 5-30	RossmnCove	7,50	358,57	50,80	1,90	9,95	47,58	74,43
EL24 C1 0-10	RossmnCove	nd	58,44	37,80	2,10	55,98	103,15	130,13
EL24 C2 10-25	RossmnCove	23,90	28,37	41,70	0,70	29,60	61,14	57,54
EL24 C3 25-30	RossmnCove	0	22,48	59,90	2,10	16,42	40,38	60,28
EL25 C1 0-25	KoscoPeak	0	68,97	79,80	11,30	95,39	80,37	85,73
EL28 C1 0-5	Conglomerate Ridge	52,30	89,71	58,80	4,70	19,57	57,22	151,04
EL28 C2 5-10	Conglomerate Ridge	82,40	115,42	51,50	4,20	19,49	32,33	129,84
	Número de amostras	17	18	18	18	18	18	18
	Teor mínimo	0	22,48	34,20	0,70	4,06	28,48	51,16
	Teor máximo	95,70	358,57	79,80	13,80	118,58	103,15	224,76
	Teor médio	16,54	84,19	54,18	4,21	29,66	47,96	96,4
	Coefficiente de variação (%)	181,10	104,22	26,00	77,20	107,79	39,09	45,89

¹Cátions e ânions provenientes no extrato solo:álcool 1:5

O cátion Ca^+ possui valores médios em torno de 54 mg/L em todos os perfis, chegando ao seu teor máximo de 79,8 mg/L em EL25 (KoscoPeak), perfil com forte influência de conglomerados-mármore e quartzitos, mostrando assim como o K^+ uma maior influência do intemperismo químico. Por fim, o Mg^+ possui baixas concentrações em todos os solos, não ultrapassando o valor máximo de 13,8 mg/L encontrado em EL15, mostrando, de acordo com Keys e Williams (1981) uma clara associação entre a distribuição deste cátion e a presença de substrato de rochas ígneas.

Em relação aos três ânions analisados, de forma geral, as concentrações de Cl^- diminuem em profundidade, exceto em EL15 (Edson Hills); perfil no qual a concentração aumenta consideravelmente e em EL20 (Edson Hills) que apresenta um pequeno aumento, mostrando uma maior condição de drenagem nos perfis deste local. EL1 (Mount Dolence) e EL25 (KoscoPeak) apresentam teores altos deste ânion (118,58 mg/L e 95,39 mg/L, respectivamente). O Cl^- assim como o Na^+ apresenta uma ampla distribuição, como se é esperado de sais de origem marinha como dito por Bockheim (2002).

O NO_3^- apresenta concentrações médias em torno de 30 mg/L sendo que os perfis EL24 (103,15 mg/L, RossmanCove) e EL25 (80,37 mg/L) possuem os maiores teores. O ânion SO_4^{2-} possui o maior teor médio dos três ânions analisados (96,4 mg/L), tendo no perfil EL15 o maior valor, encontrado em um horizonte subsuperficial (224,76 mg/L). Os perfis EL28 (Conglomerate Ridge), EL24 e EL20, também possuem altos teores, entretanto, diferentemente de EL15, as concentrações diminuem em profundidade. Há uma relação inversamente proporcional entre as concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- e a concentração de Cl^- . Keys e Williams (1981) descrevem esta relação mostrando que os maiores raios de $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ e $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ são encontrados longe da costa, ou seja, sem a influência direta recente da água do mar, o que no contexto de Ellsworth, pode ser interpretado como locais com menor disponibilidade de água no estado líquido.

3.3 DISTRIBUIÇÃO DOS SAIS SOLÚVEIS

De forma geral, os solos desenvolvidos em maiores altitudes (> 885 m), como os perfis EL1, EL2 (Mount Dolence), EL4 (Elephant Head), EL25 (KoscoPeak), EL27 e EL28 (Conglomerate Ridge) (Tabela 3.4), possuem uma maior capacidade de acumulação em relação aos solos desenvolvidos em altitudes menores. Essa maior salinidade é justificada por essas áreas mais elevadas corresponderem aos solos com um maior tempo de exposição de superfície, pois foram expostos a um período maior de tempo. Alguns perfis apresentam comportamento diferente do indicado acima, como os perfis EL7 e EL8 (942Peak), devido a presença de líquens o que revela maior disponibilidade de água, e o EL6 (Elephant Head), devido a uma maior proximidade um grande neveiro, fonte de umidade e lixiviação de sais no ambiente.

Os perfis EL7, EL8, EL15, EL17, EL18, EL21, EL23, EL24 e EL26 apresentam superfície com padrão com diferentes níveis de desenvolvimento. Os solos sobre os quais o desenvolvimento das guirlandas de pedras é moderada (EL17, EL18, EL21) (Edson Hills) acumulam maior salinidade, quando comparados aos de fraco desenvolvimento, pois apresentam maiores valores de CE e ISNa. A salinidade presente nessas guirlandas de pedra bem desenvolvidas se dá devido a capacidade destas de proteção contra os fortes ventos que atingem a região de Ellsworth, e não a condição de umidade pretérita necessária para a formação de solos poligonais, devido aos ciclos de congelamento e descongelamento, pois esta umidade seria fonte de remoção destes sais do ambiente.

Contudo, são encontrados baixos teores de acumulação em EL7 e EL8 (942 Peak), e EL23 e EL24 (RossmanCove), onde há um farto desenvolvimento de líquens, os quais apenas se desenvolvem sobre presença de umidade. Nestes solos não ocorrem sais dispersos no perfil, apenas em superfície.

Os solos deste trabalho foram coletados sobre diferentes geoformas: encostas de detritos, circo glacial, platô *felsenmeer*, vale glacial, morainas e plataforma de crioplanção. Os solos sobre as encostas de detritos, como em EL1, EL2, EL3 (Mount Dolence), EL16 (RossmanCove), EL20 (Edson Hills) e EL27 (Conglomerate Ridge) tendem, de forma geral, a acumular pouco sal, exceto pelos perfis EL19 (Edson Hills) e EL25 (KoskoPeak) que apresentam considerável tendência de acumulação. A maior salinidade está relacionada a influência da geometria das encostas de detrito sobre a drenagem do local. Encostas de geometria convexa tendem a ser mais bem drenadas que as encostas de geometria côncava. Deste modo, uma maior acumulação de sais é encontrada sobre as encostas de detritos convexas.

Dos solos coletados sobre circo glacial, EL4, EL5 e EL6 (Elephant Head), o único com maior tendência de acumulação salina é o perfil EL4, o qual foi coletado no terço superior dessa geoforma. Circos glaciais acumulam neve em seus centros durante os períodos de maior precipitação. A neve estará então sujeita a derretimento durante os períodos de temperaturas mais amenas, se tornando fonte de água no estado líquido. Sendo assim, a umidade em um circo glacial está mais restrita ao seu centro do que em suas bordas, onde o perfil EL4 foi coletado.

Os perfis EL7 e EL8 (942 Peak) apresentam a menor tendência de acumular salinidade dentre todos os solos estudados e estão localizados sobre um platô *felsenmeer*, além de possuírem presença de líquenes crustosos (indicadores de umidade). Já os solos EL15, EL17, EL18, EL21 foram coletados em fundo de vale glacial em Edson Hills e EL23 e EL24 em RossmanCove. Os solos de Edson Hills apresentam uma maior expressividade na acumulação de salinidade devido ao desenvolvimento de guirlandas de pedras.

Apenas dois solos foram coletados sobre morainas, o EL22 e o EL26, entretanto, cada uma delas possui características diferentes. O perfil EL22 (Edson Hills) foi coletado em uma moraina

lateral na saída do vale glacial, com um maior grau de heterogeneidade do material morânico, permafrost seco e solo bem drenado, não sendo capaz de reter umidade em si. Já o EL26 (Kosco Peak), foi coletado em uma moraina do tipo *hummocky*, com material morânico com menor heterogeneidade, permafrost cimentado por gelo e solo imperfeitamente drenado. Estes dois cenários distintos produzem um claro contraste nas condições de acumulação de sal entre os dois sistemas morânicos. O solo desenvolvido sobre o material morânico do tipo *hummocky*, por possuir mais água disponível e ter permafrost cimentado por gelo, está mais sujeito a ciclos de descongelamento - culminando em um sistema muito menos conservador em relação à salinidade (Delpupo et al. 2017).

Por fim, o solo EL28 foi o único coletado em uma plataforma de crioplaneação e é o solo com a maior evidência de acumulação de todo o trabalho. Sendo o único a apresentar um horizonte fracamente cimentado por sal. Claramente, trata-se de uma superfície de exposição mais antiga. A história glacial da região remonta retração da geleira local, retração esta marcadamente altitudinal (Denton et al 1992).

Em relação a litologia, os solos desenvolvidos sobre mármore tendem a desenvolver maior acumulação salina do que os solos desenvolvidos sobre quartzitos, indicando uma maior atuação do intemperismo. Devido à sua assembleia mineralógica, o mármore apresenta uma maior fragilidade frente ao intemperismo (químico e físico) do que os quartzitos, se tornando então, prováveis fontes mais eficientes de cátions e ânions. Os solos desenvolvidos sobre filitos e metavulcânicas apresentam acumulação moderada e bandas de argilite não influenciam nos teores de sais no perfil.

Tabela 3.4. Descrição geral, localização e classificação dos perfis de solos da porção sul das montanhas Ellsworth, Antártica Continental

Perfil	Altitude (m)	Localização	Coordenadas ¹	Geoforma	Rocha	Descrição	Classificação Soil Taxonomy
EL1	886	Mount Dolence	79°49'31,3" 83°11'81,1"	Terço médio de encosta de detritos convexa(EDMA ²)	Quartzitos cinza escuro e verde	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 20 cm; pavimento pedregoso de 2 cm.	Lithic Anhyorthel
EL2	935	Mount Dolence	79°49'28,6" 83°12'37,4"	Terço superior de encosta de detritos convexa(EDMA)	Quartzitos cinza escuro e verde	Solo moderadamente drenado; não vegetado; permafrost seco a 20/25 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Anhyorthel
EL3	850	Mount Dolence	79°49'14,9" 83°12'02,6"	Terço inferior de encosta de detritos côncava(EDML ²)	Quartzitos cinza escuro e verde	Solo próximo a neveiro; bem drenado; não vegetado; permafrost a 12 cm; pavimento pedregoso de 4 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Haploturbel
EL4	893	Elephant Head	79°49'46,3" 83°19'52,5"	Terço superior de circo glacial	Mármore	Solo moderadamente drenado; não vegetado; permafrost seco a 15 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Anhyorthel
EL5	856	Elephant Head	79°49'28,4" 83°19'09,3"	Terço médio de circo glacial	Mármore e quartzitos	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 10/15 cm; pavimento pedregoso de 4 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Anhyorthel
EL6	817	Elephant Head	79°49'15,2" 83°19'26,9"	Terço inferior de circo glacial	Quartzitos	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 30 cm; pavimento pedregoso de 1.5 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Anhyorthel
EL7	886	942 Peak	79°46'21,6" 82°30'47,4"	Porção central de platô em <i>Felsenmeer</i>	Quartzitos com bandas de argilitos	Solo moderadamente drenado; presença de líquens crustosos e musgos, permafrost cimentado por gelo a 10/12 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 4 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Haploturbel
EL8	915	942 Peak	79°46'42,3" 82°30'12,8"	Borda de platô em <i>Felsenmeer</i>	Quartzitos com bandas de argilitos	Solo moderadamente drenado; presença de líquens crustosos e musgos, permafrost cimentado por gelo a 10/15 cm; fraco desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 5 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Haploturbel
EL15	808	Edson Hills	79°49'12,4" 83°40'16,1"	Fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões	Filitos e metavulcânicas	Solo moderadamente drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; presença de cunha de gelo; fraco desenvolvimento de guirlandas de pedra; pavimento pedregoso de 5 cm.	Tipic Haploturbel
EL17	816	Edson Hills	79°48'55,5" 83°39'55,5"	Fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões	Filitos e metavulcânicas	Solo moderadamente drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedra; pavimento pedregoso de 1.5 cm.	Tipic Haploturbel
EL18	840	Edson Hills	79°48'58,5" 83°39'03,4"	Fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões	Filitos e metavulcânicas	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 15 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedra; pavimento pedregoso de 2 cm.	Tipic Haploturbel

Tabela 3.4. Descrição geral, localização e classificação dos perfis de solos da porção sul das montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Continuação

Perfil	Altitude (m)	Localização	Coordenadas ¹	Geoforma	Rocha	Descrição	Classificação Soil Taxonomy
EL19	827	Edson Hills	79°48'53,5" 83°39'00,4"	Encosta de detritos (Face pico Lester)	Filitos e metavulcânicas	Solo moderadamente drenado; não vegetado; lamelas de oxidação dispersas no perfil; permafrost seco a 25 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 20 cm.	Lithic Anhyorthel
EL20	820	Edson Hills	79°49'13,3" 83°38'53,1"	Encosta de detritos (Face oposta pico Lester)	Filitos e metavulcânicas	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 35 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 50 cm.	Lithic Anhyorthel
EL21	809	Edson Hills	79°49'11,8" 83°39'18,0"	Fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões (porção jusante do vale e face oposta Pico Lester)	Filitos e metavulcânicas	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedra; pavimento pedregoso de 2/3 cm.	Tipic Haploturbel
EL22	812	Edson Hills	79°49'09,0" 83°38'39,4"	Topo de moraina lateral da Geleira Union na saída do vale glacial rochoso.	Material morânico heterogêneo (conglomerados-mármore, grauvacas, filitos, metavulcânica, argilitos e quartzitos)	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 20 cm; feições periglaciais como <i>termokarst</i> , <i>lagos de degelo</i> e <i>poças congeladas associadas</i> .	Tipic Anhyorthel
EL16	899	Rossmann Cove	79°48'02,4" 82°55'50,1"	Terço médio encosta de detritos convexa (EDMA)	Quartzitos verde claro	Solo moderadamente drenado; não vegetado; permafrost a 30 cm; pavimento pedregoso de 2 cm; contato lítico a 50 cm.	Lithic Haploturbel
EL23	764	Rossmann Cove	79°47'43,8" 82°56'36,3"	Porção mais elevada de fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrão	Quartzitos verde claro	Solo moderadamente drenado; presença de líquens crustosos; permafrost cimentado por gelo a 45 cm; fraco desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 2 cm.	Tipic Haploturbel
EL24	729	Rossmann Cove	79°47'44,2" 82°55'49,5"	Porção mais deprimida de fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrão	Quartzitos verde claro	Solo imperfeitamente drenado; presença de líquens crustosos; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 2 cm.	Tipic Haploturbel
EL25	893	Kosco Peak	79°47'00,6" 83°44'31,7"	Terço médio de detritos convexa (EDMA)	Conglomerados-mármore e quartzitos)	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 40 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 65 cm.	Calcic Anhyorthel
EL26	830	Kosco Peak	79°46'58,2" 83°44'11,3"	Moraina hummocky	Material morânico heterogêneo (conglomerados-mármore e quartzitos)	Solo imperfeitamente drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 20 cm; presença de cunha de gelo; fraco desenvolvimento de padrões na superfície; pavimento pedregoso de 8 cm; feições periglaciais como lagos de degelo e poças congeladas associadas.	Tipic Haploturbel
EL27	973	Conglomerate Ridge	79°43'59,5" 83°55'58,3"	Terço médio de encosta de detritos	Quartzitos, xistos e mármores	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 20 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 25 cm.	Lithic Anhyorthel
EL28	959	Conglomerate Ridge	79°43'57,5" 83°56'10,9"	Plataforma de crioplaneação	Quartzitos, xistos e mármores	Solo bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 40 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 35 cm; forte gradiente térmico, horizonte superficial salino (nátrico).	Sodic Anhyorthel

3.4 ORIGEM DOS SAIS SUPERFICIAIS

A origem das acumulações de sais em desertos polares, como é o caso das Montanhas Ellsworth, na Antártica, pode ser inferida por meio da geoquímica dos sais solúveis presentes nos solos (Bockheim&Leide 1980, Denton et al 1992, Bockheim 1997, Diaz et al 2020). Os trabalhos com esta temática apontam, de forma geral, que embora múltiplas fontes sejam possíveis, a deposição atmosférica tem importância primordial.

Um trabalho realizado em Heritage Range por Denton (1992) aponta que cálcio e sulfato são, respectivamente, os cátions e ânions dominantes na área. Apesar do encontrado por Denton (1992), os dados presentes na Tabela 3.3 indicam que as áreas livres de gelo da Geleira Union o cátion com maior teor médio é o sódio, apesar do sulfato se manter como ânion dominante. Este cenário pode indicar que a região da Geleira Union possa representar a de maior acumulação de sal das Montanhas Ellsworth, já que o sódio geralmente está associado a sistemas muito pouco lixiviados.

Nas áreas livres de gelo de Heritage Range, os principais sais encontrados são gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), seguido por calcita (CaCO_3) e mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (Denton 1992). O autor havia observado que as concentrações de calcita independem da litologia sobre a qual ela se forma, corroborando a ideia de fontes externas. Neste trabalho, a análise geoquímica utilizando-se do MEV-EDS feita sobre a interface crosta salina/rocha das amostras EL23 (Figura 3.2) e EL7 (Figura 3.3) também sugerem essa independência entre a composição do sal encrustado e da rocha subjacente.

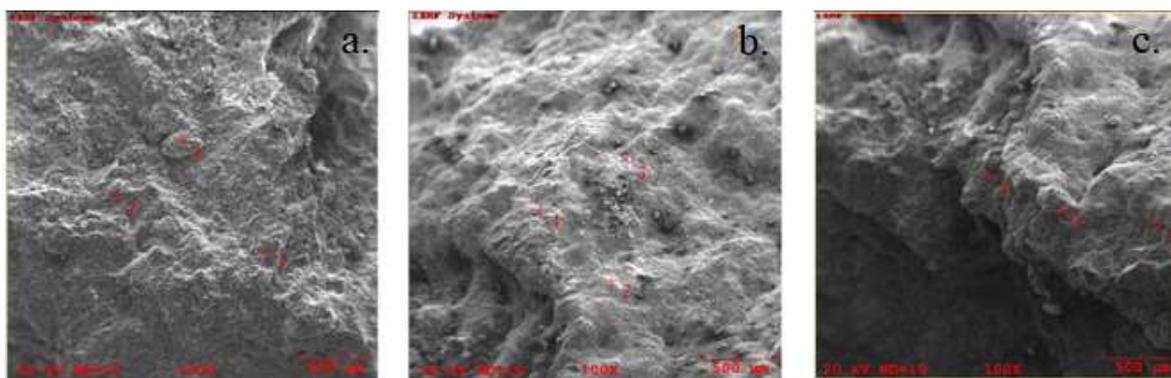


Figura 3.2 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura sobre amostra EL23 (RossmanCove): superfície da rocha (a); superfície do sal (b); superfície de transição (c) (Fonte: imagens cedidas por Caroline Delpupo)

Tabela 3.5: Dados composicionais da amostra EL23

Elemento	Rocha			Sal			Transição		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Concentração (wt.%)									
Na	0,484	0,363	0,319	1,028	0,572	0,267	0,334	0,118	0,41
Mg	1,092	2,720	0,606	0,905	1,015	0,413	0,322	0,759	1,158
Al	7,444	23,958	3,606	0,833	2,943	2,519	1,853	4,090	4,825
Si	20,737	50,069	90,188	4,965	9,733	11,674	27,294	9,422	9,216
P	0,096	0,291	0,000	0,071	0,022	0,000	0,232	0,012	0,18
S	0,298	0,338	0,633	0,380	0,501	0,545	0,059	0,015	0,546
Cl	-	-	-	0,041	0,099	0,072	0,009	0,000	0,033
K	19,201	14,799	2,079	0,121	0,660	1,459	0,684	1,063	1,529
Ca	2,626	1,880	0,677	16,516	15,105	38,499	1,127	6,170	19,095
Ti	1,696	0,274	0,101	-	-	-	-	-	-
V	1,607	0,139	0,066	-	-	-	-	-	-
Cr	0,267	0,011	0,056	-	-	-	-	-	-
Mn	2,713	0,231	0,040	-	-	-	-	-	-
Fe	38,178	4,129	0,838	0,127	0,417	1,063	0,288	0,517	1,399
Ni	0,583	0,137	0,219	-	-	-	-	-	-
Cu	1,633	0,113	0,063	-	-	-	-	-	-
Zn	1,345	0,260	0,261	-	-	-	-	-	-
Zr	0,000	0,286	0,247	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	17,700	16,348	6,972	14,261	22,196	14,532
N	-	-	-	0,717	0,000	0,000	0,119	0,000	0
O	-	-	-	56,043	52,424	36,519	53,296	55,637	46,942
B	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0
F	-	-	-	0,551	0,162	0,000	0,124	0,000	0,136
Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

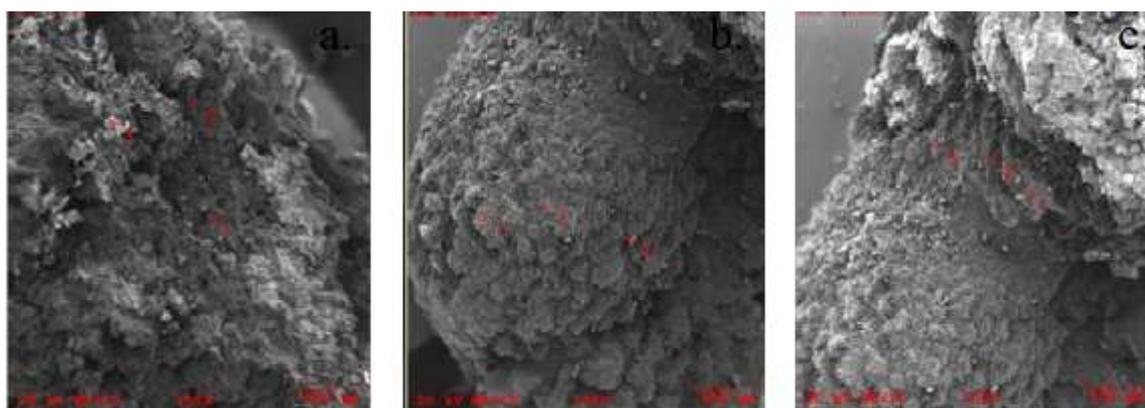


Figura 3.3 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura sobre amostra EL7 (942 Peak): superfície da rocha (a); superfície do sal (b); superfície de transição (c). (Fonte: Imagens cedidas por Caroline Delpupo)

Tabela 3.6: Dados composicionais da amostra EL7

Elemento	Rocha			Sal			Transição		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
	Concentração (wt.%)								
Na	0,499	4,216	2,019	0,540	0,954	0,596	0,337	0,589	0,651
Mg	1,361	1,518	2,326	1,579	0,632	0,475	0,393	1,116	0,397
Al	3,972	5,805	5,160	2,109	1,615	0,464	0,919	1,331	1,17
Si	7,890	10,536	13,538	9,313	4,335	0,746	1,252	3,579	2,278
P	0,000	0,191	1,031	0,013	0,000	0,040	0,059	0,055	0,016
S	4,577	3,685	2,256	7,411	1,979	16,776	20,049	14,841	13,429
Cl	-	-	-	0,034	0,144	0,018	0,000	0,045	0,0145
K	1,529	2,053	3,499	0,232	0,416	0,000	0,215	0,210	0,203
Ca	9,161	20,858	4,963	5,757	9,987	14,008	22,003	13,709	11,457
Ti	2,011	0,776	1,287	-	-	-	-	-	-
V	0,000	0,000	1,915	-	-	-	-	-	-
Cr	0,732	0,407	0,352	-	-	-	-	-	-
Mn	0,061	0,840	0,418	-	-	-	-	-	-
Fe	22,434	16,180	6,643	1,214	1,333	0,136	0,171	0,647	0,197
Ni	0,000	1,330	4,143	-	-	-	-	-	-
Cu	30,129	13,900	26,454	-	-	-	-	-	-
Zn	14,100	17,538	21,399	-	-	-	-	-	-
Zr	1,543	0,168	2,597	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	14,400	14,404	10,995	20,068	11,570	9,473
N	-	-	-	0,859	0,000	0,501	0,000	0,966	0,553
O	-	-	-	56,539	63,645	55,245	34,536	51,343	60,162
B	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0
F	-	-	-	0,000	0,557	0,000	0,000	0,000	0
Total (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Rutford (1969) estudou a composição da neve precipitada nas Montanhas Ellsworth. Os resultados obtidos mostraram que o sódio se apresentou como o cátion dominante, seguido por Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , além de que o cloreto se apresentou como o principal ânion. Neste estudo a razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ para a neve apresentou valores médios em torno de 0,6 (valores máximos equivalentes a 0,84), corroborando a teoria de que fontes externas seriam a principal origem de salinidade nestes ambientes.

Nestes trabalhos apresentados, além de o sódio não ter se apresentado como cátion dominante, seus teores de forma geral aumentavam com a profundidade. Os autores atribuíram esse comportamento à lixiviação. Esse padrão não foi observado nos dados geoquímicos apresentados dos solos coletados nas áreas livres de gelo da Geleira Union. Neste caso, o Na^+ é o cátion com maior teor médio, e seus teores podem ou não aumentar em profundidade. Esta diferença pode ocorrer devido a menor disponibilidade de umidade nesta área.

Diaz *et al.* (2020), em seu estudo nas áreas livres de gelo da Geleira Shackleton, nas Montanhas Transantárticas, também ambiente de deserto polar, pôde estabelecer a provável origem dos ânions NO_3^- e SO_4^{2-} em sais como a gipsita e mirabilita, por meio do estudo de isótopos estáveis. De acordo com a composição isotópica encontrada para estes ânions, a autora concluiu que SO_4^{2-} foi precipitado principalmente como sulfato atmosférico secundário. Apesar de haver evidências que parte deste ânion pode ter origem no intemperismo químico de cristais de pirita, ainda sim, a fonte atmosférica é a principal, especialmente em solos em altas altitudes e expostos a um longo período de tempo. Em relação ao NO_3^- , foi observado que este também tem origem na atmosfera, com contribuições variáveis da troposfera (0-70 %) e da estratosfera (30-100 %)

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

As acumulações salinas da porção sul das Montanhas Ellsworth apresentam características semelhantes às acumulações salinas de outras regiões desérticas da Antártica. De forma geral, estas se formam sobre condições de aridez extrema, resultante da baixa, ou nenhuma, disponibilidade de água no estado líquido, temperaturas extremamente negativas durante os meses de inverno, e forte influência dos ventos catabáticos que atingem essas regiões polares. A composição, distribuição e origem dessas acumulações salinas estão diretamente associadas à influência da água do mar e dos ventos, às litologias presentes e às geoformas nas quais se formam.

O cátion Na^+ e o ânion SO_4^{2-} apontam ser os principais componentes da salinidade em Ellsworth, possuindo os maiores teores médios. De toda forma, Ca^+ , Cl^- , e NO_3^- também possuem forte participação na composição das acumulações salinas, restando apenas ao Mg^{2+} e ao K^+ uma menor influência. A composição salina encontrada corrobora as origens diretamente relacionadas à precipitação atmosférica dos sais superficiais de Ellsworth, transcorrida em condição predominantemente continental e com pouca influência de sprays de origem marinha.

A distribuição da salinidade em Ellsworth depende eminentemente do tempo de exposição da superfície, da geoforma e da litologia presente. Sob o ponto de vista do tempo de exposição das superfícies, há uma clara relação entre o recente recuo altitudinal da geleira local (experimentado em toda a Antártica Ocidental) e as maiores acumulações salinas. As geoformas que proporcionam maior proteção física contra os fortes ventos constantes, como as onde ocorrem os solos poligonais, apresentam moderada acumulação salina. As vertentes convexas de detritos com permafrost seco também apresentam condições favoráveis para acumulação de sais. Por fim, as litologias mais tenras, notadamente, mármore, filito e metavulcânicas, representam fontes de sais derivados diretamente do intemperismo.

De maneira geral, a presença da vida na região da Geleira Union indica condições pouco favoráveis à acumulação salina. As raras coberturas de líquens crustosos ocorrem onde a disponibilidade de água líquida é maior. Tal condição indica a ocorrência de processos periglaciais típicos de áreas mais úmidas, como a Antártica Marítima e Peninsular, onde a ocorrência de sais é restrita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bockheim, J. G., Leide, J. E. 1980. Soil development and rock weathering in the Ellsworth Mountains, Antarctica. *Antarctic Journal of the United States*, **14**: 58-59.
- Bockheim, J. G., 1997. Properties and classification of Cold Desert soils from Antarctica. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **61**: 224-231.
- Bockheim, J. G., 2002. Landform and Soil development in the McMurdo DryValleys, Antarctica: A regional Synthesis. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. **34(3)**: p. 308-317.
- Bockheim, J. G., 2014. *Cryopedology*. Springer Briefs, Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison, USA, 247p.
- Bockheim, J. G., Schaefer, C.E.G.R., 2015. Soils of Ellsworth Land, the Ellsworth Mountains. in Bockheim, J.G. (Ed.). *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. Springer, Switzerland, p. 169-181.
- Bockheim, J. G.; Hall, K. 2002. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *Periglacial Research. South African Journal of Science*. p. 82-90.
- Bullock, P.; Federoff, N.; Jongerius, A. 1985. Handbook for soil thin section description. *Waine Research publications*. Wolverthampton:
- Campbell, I.B.; Claridge, G.G.C. 1987. *Antarctica: soils, weathering process and environment*. Elsevier-Amsterdam, 368 p.
- Campbell, I.B.; Claridge, G.G.C. 2004. Mountains Region of Antarctica & Soil Properties and Relationships in Cryosols of the Region of the Transantarctic Mountains in Antarctica. in: Kimble, J. M (ed.). *Cryosols - Permafrost-Affected Soils*. Springer, New York, p. 391-415 e p. 699-713.
- Claridge, G.G.C.; Campbell, I.B. 1968. Some features of Antarctic soils and their relation to others deserts soils. *Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci.*, **4**: 541-549.
- Claridge, G.G.C.; Campbell, I.B. 1982. A comparison between hot and cold desert soils and soil processes, in D. H, Yaalon (ed.). *Aridic soils and geomorphic processes. Catena supplement. I*. Braunschweig, p. 1-28.
- Costa, V. C. S., Vieira, R. 2017. Geomorfologia e Sedimentologia da Geleira Union, Montanhas Ellsworth, Antártica Ocidental. *XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. I Congresso Nacional de Geografia Física*. Instituto de Geociências, Unicamp-Campinas, São Paulo, p.3118-3029.
- Craddock, C. 1969. Geology of the Ellsworth Mountains, in Bushnell, V. C, and Craddock, C., (eds.). Geologic maps of Antarctica. *American Geographical society*. Antarctic Map Folio Series. New York, Folio 12, plate 4.
- Dana, G.L., R.A. Wharton, and R. Dubayah. 1998. Solar radiation in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. in J.C. Priscu (ed.). Ecosystem Dynamics in a Polar Desert: the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Antarctica Research Series, American Geophysical Union*. **72**: p. 39-64.
- Delpupo, C. et al. 2017. Soil and landform interplay in the dry valley of Edson Hills, Ellsworth Mountains, continental Antarctica. *Elservier* **295**: 134-146.
- Denton, G.H., Bockheim, J.G., Ruttford, R.H., Andersen, B.G., 1992. Glacial history of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. in Webers, G.F., Craddock, C., Splettstoesser, J.F. (eds.). Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. *Geological Society of America*. Colorado, p. 403-433.
- Diaz, M. A., Li, J., Michalski, G., Darrach, T. H., Adams, B. J., Wall D. H., Hogg, I. D., Fierer, N., Welch, S. A., Gardner, C. B. and Lyons, W. B. 2020. Stable Isotopes of Nitrate, Sulfate, and

Carbonate in Soils From the Transantarctic Mountains, Antarctica: A Record of Atmospheric Deposition and Chemical Weathering. *Front. Earth Sci.* **8**:341.

French, H. M. 2007. *The Periglacial Environment*. John Wiley & Sons Ltd, England, 117p.

Gjorup, D. F. 2013. *Solos e Geoambientes da Porção Norte da Ilha Seymour (Marambio), Antártica*. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 109p.

Gore, D. B.; Creagh, D. C.; Burgess, J. S.; Colhoun, E. A.; Spate, A. P.; Baird, A. S., 1996 Composition, distribution and origin of surficial salts in the Vestfold Hill, East Antarctica. *Antarctic Science* **8**, **1**: p. 73-84.

Keys, J. R. H.; Williams, K., 1981. Origin of crystalline, cold desert salts in the McMurdo region, Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta. Elsevier.* **45**: p. 2299-2309.

Marshak S. 2012. *Earth Portrait of a Planet*. Canada, Norton & Company Inc, p. 716-784.

Riffenburg, B. 2007. *Encyclopedia of Antarctic*. Routledge Taylor & Francis Group, United States of America, p. 740-741.

Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and alkali Soils..*Soil Science*, **78**: 154 p.

Rivera, A., R. Zamora, C. Rada, J. 2010. Glaciological investigations on Union Glacier, Ellsworth Mountains, West Antarctica. *Ann. Glaciol*, **51**: p. 91-95.

Rutford, R. H. 1969. *The glacial geology and geomorphology of the Ellsworth Mountains, East Antarctica*. Ph.D. thesis, Minneapolis, University of Minnesota: 289 p.

Rutford, R. H. 1972a. Drainage systems of the Ellsworth Mountains area [abs.], in Adie, R. J., (ed.). *Antarctic geology and geophysics*. Oslo, Universitetsforlaget, p. 233.

Rutford, R. H., 1972b, Glacial geomorphology of the Ellsworth Mountains, in Adie, R. J.(ed.). *Antarctic geology and geophysics*. Oslo, Universitetsforlaget, p. 225-232.

Rutford, R. H., Bockheim, J. G., Andersen, B. G., and Denton, G. H. 1982. Glacial history of the Ellsworth Mountains, West Antarctica. *Geological Society of America Abstracts With Programs*, **14**: p. 605-606.

Rutford, R. H., Denton, G. H., and Andersen, B. G. 1980. Glacial history of the Ellsworth Mountains. *Antarctic Journal of the United States*, **15**: 56-57.

Simas, F. N. B. 2006. *Solos na baía do almirantado, Antártica Marítima: Mineralogia, Gênese, Classificação e Biogeoquímica*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 165p.

Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*, 11th ed. USDA-NRCS, Washington, DC

Souza, C. D. 2015. *Solos e interações pedogeomorfológicas nas Montanhas Ellsworth, Antártica Continental*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 118p.

Sporli, K. B. 1992. Stratigraphy of the Crashsite Group Ellsworth Mountains, West Antarctic. in Webers, G.F., Craddock, C.; Splettstoesser, J.F. (eds.). *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. Geological Society of America*. Colorado, p. 21–37.

Toner, J. D.; Sletten, R. S.; Prentice, M. L., 2013. Soluble Salts accumulations in Taylor Valley, Antarctica: Implications for paleolakes and Ross Sea Ice Sheet dynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. **118**: p. 198-215.

Ugolini, F.C., Bockheim, J.G. 2008. *Antarctic soils and soil formation in a changing environment: a review*. *Geoderma*, **144**: p. 1-8.

Webers, G.F.; Bauer, R. L.; Anderson, J. M.; Buggisch, W.; Ojakangas, R. W.; Sporli, K. B. 1992. The Heritage Group of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. in Webers, G.F., Craddock, C.;

Souza, J. G. R de. 2022. Origem, composição e distribuição de sais superficiais...

Splettstoesser, J.F. (eds.). Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. *Geological Society of America*. Colorado, p. 9–21.

Webers, G.F.; Craddock, C; Splettstoesser, J.F., 1992. Geologic history of Ellsworth Mountains, West Antarctic. in Webers, G.F., Craddock, C.; Splettstoesser, J.F. (eds.). Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic. *Geological Society of America*. Colorado, p. 1–9.

Wellman, H.W; Wilson, A.T. 1965. Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. *Naturev*, **205**: 1097-1098.