

CAROLINE DELPUPO SOUZA

SOLOS E INTERAÇÕES PEDOGEO MORFOLÓGICAS NAS MONTANHAS ELLSWORTH,
ANTÁRTICA CONTINENTAL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729s
2015 Souza, Caroline Delpupo, 1986-
Solos e interações pedogeomorfológicas nas Montanhas
Ellsworth, Antártica Continental / Caroline Delpupo Souza. –
Viçosa, MG, 2015.
viii, 118f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves R. Schaefer.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solo - Antártica Continental. 2. Geomorfologia -
Antártica Continental. 3. Química do solo. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de
Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

CAROLINE DELPUPO SOUZA

SOLOS E INTERAÇÕES PEDOGEO MORFOLÓGICAS NAS MONTANHAS ELLSWORTH,
ANTÁRTICA CONTINENTAL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 06 de novembro de 2015.

Fábio Soares de Oliveira

Raphael Bragança Alves Fernandes
(Coorientador)

Ivan Carlos Carreiro Almeida

Marcio Rocha Francelino

Carlos Ernesto G. Reynaud Schaefer
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro por ter custeado meus estudos desde a educação básica até a pós-graduação.

À Universidade Federal de Viçosa, instituição pública e de qualidade; e ao Departamento de Solos, um dos melhores do país em sua área do conhecimento, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Capes e ao CNPq pela concessão das bolsas de estudo.

Ao Laboratório Terrantar pela oportunidade de ingressar na aventura que é trabalhar com ecossistemas terrestres da Antártica. Ao Programa Antártico Brasileiro, CNPq, Marinha do Brasil e Força Aérea Brasileira pelo apoio operacional, logístico e financeiro durante a expedição ao continente gelado.

Ao Laboratório de Geoquímica de Solos por ter me acolhido e ter sido minha casa desde os tempos da iniciação científica.

Ao professor Carlos Ernesto pela orientação, amizade e eterna inspiração.

Ao professor Liovando da Costa pela amizade e diversos ensinamentos acadêmicos e não acadêmicos.

Ao professor André Faria do Departamento de Geografia da UFV pela ajuda, principalmente no que diz respeito ao mapeamento geomorfológico.

Ao professor Roberto Michel do Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais da Universidade Estadual de Santa Cruz pela fundamental ajuda no capítulo do monitoramento térmico e hídrico dos solos.

Aos professores do Departamento de Solos João Ker, Maurício Fontes e Cristine Muggler, que sempre me serviram de espelho profissional.

As estagiárias Mariane Batalha, Julia Monari e Vania Machado pela ajuda nos procedimentos laboratoriais e por tornar as horas de trabalho mais prazerosas.

Aos funcionários do DPS: as secretárias do DPS Luciana e Cláudia pela paciência e presteza; e laboratoristas Geraldo Robésio, Carlos Fonseca, José Francisco, Cláudio, Mário, Edimaldo e Zélia pela cooperação e amizade.

Aos amigos da UFV e DPS que levarei para a vida: JJ, Pablo, Natália, Nicolo, Mayara, e tantos outros que foram verdadeiros parceiros para a realização deste trabalho. Ao amigo Eduardo Senra pelo valioso apoio durante o trabalho de campo.

Aos meus pais e irmã pelo apoio ao longo de todo meu caminho acadêmico.

À Thábata, que foi o anjo que me apoiou nos momentos difíceis.

Enfim, a todas as pessoas amigas que de alguma forma me apoiaram e contribuíram para a minha formação.

Meu muito obrigada!

BIOGRAFIA

CAROLINE DELPUPO SOUZA, filha de Adair Lopes de Souza e Jucélia Delpupo Souza, é natural da cidade de Aracruz, interior do Estado do Espírito Santo. Iniciou o curso de Geografia na Universidade Federal de Viçosa em 2005, graduando-se nas modalidades bacharelado e licenciatura em 2010, mesmo ano que iniciou o curso de Mestrado. Em 2012 obteve o título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela mesma instituição. Em 2012 iniciou o curso de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, o qual se encerrou por meio da defesa desta tese, no dia 6 de novembro de 2015.

ÍNDICE

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL.....	01
CAPÍTULO 1	
Gênese, propriedades e mineralogia de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental	02
CAPÍTULO 2	
Interações pedogeomorfológicas no vale glacial dos Montes Edson, Montanhas Ellsworth, Antártica Continental	39
CAPÍTULO 3	
Estágio de intemperismo e taxas de formação de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental	68
CAPÍTULO 4	
Active layer thermal monitoring of a Dry Valley of the Ellsworth Mountains, Continental Antarctica	95
CONCLUSÕES GERAIS.....	117

RESUMO

SOUZA, Caroline Delpupo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2015. Solos e interações pedogeomorfológicas nas Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Orientador: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Coorientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.

As paisagens de deserto polar podem ser consideradas únicas no planeta. Os processos desenvolvidos sob condições climáticas extremas, como frio intenso e severa aridez induzem a formação de feições pedológicas e geomorfológicas singulares. Em um ambiente onde o agente biológico assume papel secundário é possível analisar a formação do solo a partir de uma ótica minimalista, onde os processos comuns a outras regiões do planeta transcorrem muito lentamente; e processos *endêmicos* agregam valiosas informações à Ciência do Solo. Neste contexto se insere as Montanhas Ellsworth. Esta área representa uma das grandes lacunas em estudos de caráter pedológico na Antártica, principalmente no que diz respeito à formação de solo em escala detalhada. Faltam também estudos de cronosequência de solos para avaliar comparativamente os estágios de intemperismo e as taxas de formação de solos em superfícies recentemente deglaciadas. Carece ainda de estudos cujo foco de análise seja as interações pedogeomorfológicas sob condições climáticas extremas. Por fim, há ainda muito a avançar nos estudos da dinâmica térmica e hídrica em permafrost seco. Assim, esse trabalho de tese se desenvolveu a partir de tais lacunas. A expedição ao continente gelado da equipe do Laboratório Terrantar se deu em duas etapas: uma primeira no verão de 2012/2013 e outra no verão de 2013/2014; momentos nos quais foram coletados 28 perfis de solo e foram tomadas fotografias da superfície do solo e das unidades de relevo. Os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth possuem características típicas de solos de deserto polar e se assemelham grandemente com solos de outras regiões desérticas da Antártica. São, de forma geral, esqueléticos/psamíticos, pouco profundos, com desenvolvimento incipiente de estrutura e com valores de cromas pequenos. Todos os solos acumulam sal em maior ou menor grau, a depender das condições de drenagem locais e exposição de suas superfícies; possuem pavimento pedregoso e apresentam discretas, porém típicas feições de crioturbação. Sua mineralogia demonstra a grande relação genética entre os solos e os materiais de origem

subjacente. Entretanto, a assembleia mineralógica dos solos analisados não apresentou grande variação entre os diferentes materiais parentais, já que o clima extremamente frio e severamente árido determina baixos níveis de intemperismo químico e pedogênese. O intemperismo e a pedogênese estão altamente condicionados ao clima e a natureza recente das superfícies de alteração locais. A cronossequência de solos revelou que os solos se enquadram nos estágios 2, 3 e 3,5 de intemperismo, condizente com a região climática na qual Ellsworth se encontra. Os solos mais desenvolvidos estão localizados em cotas altimétricas mais elevadas por se tratarem de superfícies mais antigas que estão expostas há mais tempo pela retração da geleira local. A geomorfologia da área do vale glacial dos Montes Edson pode ser entendida a partir de três conjuntos de unidades de relevo distintas: (i) feições paraglaciais como glaciário rochoso e feições associadas; (ii) feições supraglaciais como o sistema deposicional morânico; e (iii) feições periglaciais como solos com padrões. Todas essas feições estão relacionadas às variações do manto de gelo da Antártica Ocidental. O regime térmico dos solos de Mount Dolence é característico de solos de deserto polar afetados por permafrost seco. Embora a temperatura do ar não atinja elevados valores positivos, as variações na temperatura do solo são mais intensas durante o verão, o que mostra a resposta do solo à radiação solar. A superfície côncava (mais protegida) apresenta temperaturas mais extremas que a superfície convexa (mais exposta). A camada ativa é submetida a forte sublimação da água, de modo que o conteúdo de umidade do subsolo e sua redistribuição são insignificantes. Por fim, que feições periglaciais ativas ainda sobrevivem nesta paisagem cujas isotermas são extremamente baixas. Isso se dá graças a pulsos ocasionais de aquecimento que esta região sofre desde o Último Máximo Glacial. Assim, observar a paisagem das Montanhas Ellsworth é vislumbrar uma paisagem essencialmente fóssil.

ABSTRACT

SOUZA, Caroline Delpupo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2015. Soils and soil-geomorphology interactions of Ellsworth Mountains, Continental Antarctic. Adviser: Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Co-adviser: Raphael Bragança Alves Fernandes.

The polar desert landscapes can be considered unique in the world. The processes developed under extreme cold and dry conditions induce the formation of singular soil and geomorphological features. In an environment where the biological agent takes a secondary role it can analyze soil formation from a minimalist perspective, where common processes to other parts of the world elapse very slowly; and endemic processes add valuable information to the Soil Science. In this context falls the Ellsworth Mountains. This area is one of the major gaps in pedological character studies in Antarctica, especially with regard to the soil formation in local scale. Also lack soil chronosequence studies to benchmark the stages of weathering and soil formation rates in newly deglaciadas surfaces. There are not studies focused in soil and geomorphologically interactions under extreme climate conditions. Finally, much remains to be further study of thermal and water dynamics in dry permafrost. Thus, this thesis developed from such gaps. The expedition to the antarctic continent of Terrantar Laboratory staff took place in two stages: a first in the summer of 2012/2013 and another in the summer of 2013/2014; moments in which 28 soil profiles were collected, and photographs were taken from the soil surface and relief units. The soils of the southern portion of the Ellsworth Mountains have typical characteristics of cold desert soils and look like soil from other desert regions of Antarctica. They are, generally, skeletal/ psammitic, shallow, with incipient development of structure and color. All soil accumulates salt depending of local drainage and exposure conditions of their surfaces; they have desert pavement and discrete but typical features of cryoturbation. Their mineralogy demonstrates the great genetic relationship between soils and the underlying source materials. However, the mineralogical assembly of the soils analyzed did not show great variation between the different parental materials, since the extremely cold and arid climate determines severely low levels of chemical weathering and pedogenesis. The weathering and pedogenesis are highly conditioned to the climate and the recent

nature of the surfaces of local change. The soil chronosequence revealed that soils fall in 2, 3 and 3.5 weathering stages, consistent with the climate region where Ellsworth Mountains are. The more developed soils are located at higher altitudes because they are older surfaces that are exposed for a longer time by the retraction of the local glacier. The geomorphology of the area from glacial valley of the Edson Hills can be understood from three sets of distinct relief units: (i) paraglacial features as rocky glacier and associated features; (ii) supraglacial features as the depositional moraine system; and (iii) periglacial features such as pattern ground. All these features are related to changes of West Antarctica ice sheet. The thermal regime of Mount Dolence soils is characteristic of cold desert soils affected by dry permafrost. Although the air temperature does not reach high positive values, variations in the soil temperature is more intense during the summer, which shows the response of the soil to solar radiation. The concave surface (more protected) has more extreme temperatures than the convex surface (more exposed). The active layer is subjected to strong sublimation of water, so that the moisture content of the subsoil and its redistribution are insignificant. Finally, the active periglacial features still survive in this landscape whose isotherms are extremely low. This is achieved due to occasional pulses of heat that this region suffers from the Last Glacial Maximum. So, watch the scenery of the Ellsworth Mountains is essentially see a fossil landscape.

INTRODUÇÃO GERAL

As paisagens de deserto polar podem ser consideradas únicas no planeta. Os processos desenvolvidos sob condições climáticas extremas, como frio intenso e severa aridez induzem a formação de feições pedológicas e geomorfológicas singulares. Em um ambiente onde o agente biológico assume papel secundário, é possível analisar a formação do solo a partir de uma ótica minimalista, onde os processos comuns a outras regiões do planeta transcorrem muito lentamente; e processos *endêmicos* agregam valiosas informações à Ciência do Solo.

Distante milhares de quilômetros distantes dos complexos ambientes tropicais e subtropicais é demasiadamente abstrato pensar no clima como um fator de formação do solo (e das paisagens de uma forma geral) no limiar para ser determinante.

altamente diversificados, quimicamente e fisicamente; das mais complexas morfologias; e a minguando sob condições extremas, parecem se tornar coadjuvantes. O , que nas regiões tropicais parece muito distante, em regiões de deserto polar, assume ordem de grandeza muito mais palpável, por conta do passado recente de deglaciação. Contudo, cabe ao conduzir os caminhos da evolução das paisagens desérticas glaciais da Antártica. I

A despeito do grande conhecimento gerado sobre ecossistemas terrestres da Antártica Marítima e dos vales secos da Antártica Continental (*Dry Valleys*), as Montanhas Ellsworth ainda carecem de estudos mais detalhados que respaldem o entendimento da formação de solos, incluindo as taxas de intemperismo e pedogênese; as interações entre solos e unidades de relevo associadas e a dinâmica térmico-hídrica do permafrost e camada ativa.

Assim, esse trabalho de tese teve por objetivo analisar a formação das paisagens glaciais das Montanhas Ellsworth (Antártica Continental). Nesse sentido, buscou-se: (i) identificar os fatores e processos pedogenéticos responsáveis pela formação dos solos de deserto polar nas áreas livres de gelo da Geleira Union, Ellsworth; (ii) investigar as interações pedogeomorfológicas existentes no vale glacial dos Montes Edson; (iii) analisar comparativamente as taxas de intemperismo e formação dos solos de deserto polar desenvolvidos sobre superfícies recentemente deglaciadas da Geleira Union; e (iv) avaliar a dinâmica térmico e hídrica de solos em uma superfície côncava e outra convexa com permafrost seco em *drift* do Mount Dolence, Montanhas Ellsworth.

CAPÍTULO 1

Gênese, propriedades e mineralogia de solos de deserto polar da porção
sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental

CAPÍTULO 1

Gênese, propriedades e mineralogia de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental

RESUMO

SOUZA, Caroline Delpupo. Gênese, propriedades e mineralogia de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Viçosa: UFV, 2015. Cap. 1 (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

As Montanhas Ellsworth representam uma das grandes lacunas em estudos de caráter pedológico na Antártica, principalmente no que diz respeito à formação de solo em escala detalhada. Este estudo trabalhou com 22 perfis de solo da porção sul das Montanhas Ellsworth desenvolvidos sobre diversos materiais de origem e distintas posições da paisagem. Os solos foram caracterizados morfológica, física, química e mineralogicamente segundo métodos analíticos internacionais para estudos de pedogênese. Assim como outros solos de deserto polar da Antártica, os solos de Ellsworth são, de forma geral, esqueléticos/psamíticos, pouco profundos, com desenvolvimento incipiente de estrutura e limitado desenvolvimento de cores. Todos os solos acumulam sal, embora a concentração varie de acordo com as condições de drenagem locais e tempo de exposição das superfícies; possuem pavimento pedregoso e apresentam discretas, porém típicas feições de crioturbação. A colonização pela vegetação mostrou-se bastante dependente da maior disponibilidade de água, menor salinidade e da presença de guirlandas de pedra na superfície do solo capazes de proteger os líquens contra a ação erosiva dos fortes ventos catabáticos. Mineralogia dos solos de Ellsworth demonstra a grande relação genética entre os solos e os materiais de origem subjacente. Entretanto, a assembleia mineralógica dos solos analisados não apresentou grande variação entre os diferentes materiais parentais, já que o clima extremamente frio e severamente árido determina baixos níveis de intemperismo químico e pedogênese. Assim, o intemperismo e a pedogênese nas Montanhas Ellsworth estão altamente condicionados ao clima e a natureza recente das superfícies de alteração locais.

Palavras-Chave: Pedogênese; criossolos; gelissolos; permafrost; solos de regiões polares.

1. Introdução

A formação de solo na Antártica está restrita a menos de 0,35% do continente (45.000 km²), abrangendo áreas livres de gelo, localizadas na costa e nos vales secos entre as Montanhas Transantárticas (Bockheim, 1997; Bockheim e Ugolini, 2008; Bockheim, 2015). Por se desenvolverem em condições de extrema aridez e intenso frio, os solos da Antártica, notadamente, da Antártica Continental, vêm sendo designados como solos de deserto polar (Tedrow e Ugolini, 1966; Bockheim, 1997).

Muito ainda se discute sobre a real ocorrência de solos nos desertos polares da Antártica. Bockheim (1997) advoga que os depósitos superficiais se enquadram nas clássicas definições de solo; por apresentarem horizontes que são, em maior ou menor grau, diferentes do material de origem subjacente. Tais horizontes representam o produto da adição, perda, transformação e translocação de matéria e energia e suportam o desenvolvimento de vegetação (Soil Survey Staf, 2010).

As áreas de ocorrência de solos de deserto polar na Antártica geralmente apresentam temperaturas médias do ar anuais de -20 °C e precipitação (equivalente em água) inferior a 45 mm por ano (Schwerdfeger, 1984). Paisagens de deserto polar são muito similares às paisagens de desertos de regiões quentes, sendo compostas por pequenos lagos salinos, pavimentos pedregosos, feições de erosão eólica e acumulação de sais em superfície e subsuperfície (Campbell e Claridge, 1987; Bockheim, 1997). Estudos sobre a formação do solo em ambientes de deserto polar representam oportunidade única de se entender a pedogênese e a participação individual dos fatores de formação, graças às baixas temperaturas e limitado dinamismo das paisagens desérticas glaciais (Bockheim, 1979).

A despeito do conhecimento sobre ecossistemas terrestres da Antártica Marítima e dos vales secos da Antártica Continental (*Dry Valleys*), as Montanhas Ellsworth carecem de estudos detalhados que respaldem o entendimento da formação de solos neste ambiente. Denton et al. (1992) levantaram vinte e dois perfis de solo, abarcando áreas da Cadeia Sentinel e Cadeia Heritage, em um trabalho de referência sobre a história glacial das Montanhas Ellsworth, não se tratando, portanto, de um estudo estritamente pedológico. Recentemente, Bockheim e Schaefer (2015) estudaram a formação do solo nas Montanhas Ellsworth em nível regional, a partir do qual foi possível enfatizar a necessidade de estudos de detalhe.

O objetivo desse trabalho foi identificar os fatores e processos responsáveis pela formação dos solos de deserto polar desenvolvidos na porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental, a das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de solos desenvolvidos nos diferentes substratos e posições na paisagem da área de estudo.

2. Material e métodos

As Montanhas Ellsworth formam o acidentado grupo de montanhas da região central da Antártica Ocidental, tendo 350 km de extensão por 80 km de largura (Figura 1). É composta pela Cadeia Sentinel, ao norte, e Cadeia Heritage, ao sul, divididas pela Geleira Minnesota, no centro (Webers et al., 1992a). Possui uma orientação NNW-SSE e se limita pelas longitudes 78° e 87°W e latitudes 80°30' e 77°15'S (Denton et al., 1992).

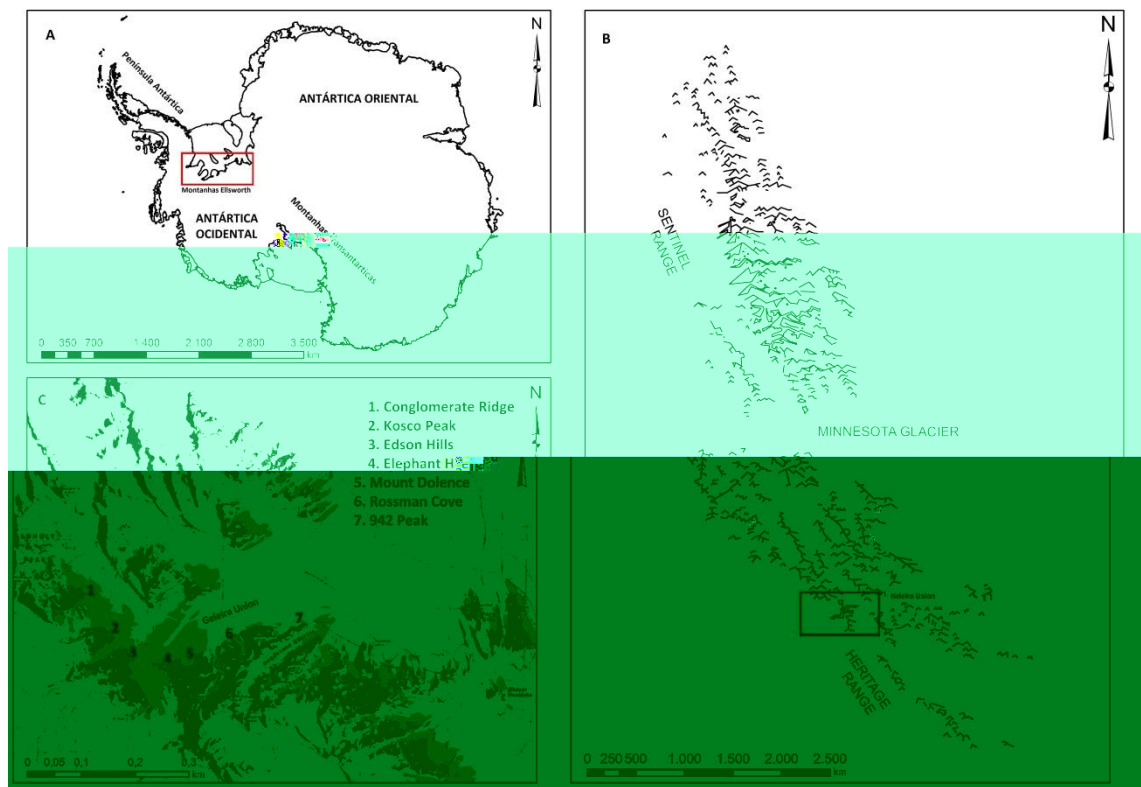


Figura 1: Montanhas Ellsworth no contexto do continente antártico (a); área da Geleira Union no contexto das Montanhas Ellsworth (b); Detalhe das áreas livres de gelo da Geleira Union (c).

A posição atual das Montanhas Ellsworth é estruturalmente anômala, situada entre e quase perpendicularmente às Montanhas Transantárticas e a Península

Antártica. Esta posição anômala, seu isolamento geográfico, seus limites norte e sul abruptos e sua estratigrafia paleozoica são explicados atualmente pela rotação da microplaca que sustenta as Montanhas Ellsworth durante o rompimento do supercontinente Gondwana (Dalziel, 2007). Estudos sugerem que as Montanhas Ellsworth representam um fragmento descolado da margem leste do Cráton Antártico (Schopf, 1969).

A coluna estratigráfica da área possui espessura maior que 13000 m e idades que vão desde o Cambriano até o Permiano (Webers et al., 1992a). O substrato é fortemente dobrado e apresenta rochas metassedimentares de origem marinha e metavulcânicas básicas de baixo grau metamórfico. Toda a cadeia se estrutura em uma anticlinal com mergulho de direção norte (Vennum e Nishi, 1992).

As Montanhas Ellsworth são constituídas por duas unidades geológicas principais, o Grupo Heritage, mais antigo e o Grupo Crashsite, mais recente, além dos sedimentos da unidade glaciogênica Whiteout Conglomerate e dos arenitos da Formação Polarstar, ambos sobre o Grupo Crashsite (Webers et al., 1992a). O Grupo Heritage, segundo Webers et al. (1992b), é compreendido por mais de 7500 m de uma sequência de filitos, argilitos, folhelhos, quartzitos, conglomerados e mármore de idades do Meso e Eocambriano. Esse grupo apresenta ainda intercalações de derrames de lava basáltica e piroclastos entre os sedimentos marinhos. O Grupo Crashsite é composto por 3000 m de quartzitos terrosos, verdes ou vermelhos e argilitos datados do Neocambriano ao Devoniano (Spörli, 1992).

A unidade Whiteout Conglomerate foi formada no período de glaciações sobre o antigo continente Gondwana, datado do Neopaleozoico. É formado principalmente por diamictito com mais de 1000 m de espessura (Matsch e Ojakangas, 1992). O topo da estratigrafia das Montanhas Ellsworth é composto por sedimentos da Formação Polarstar que compreende mais de 1000 m de argilitos e arenitos do Permiano (Collinson et al., 1992).

A Cadeia Sentinel possui escarpas de 2500 m de altitude que sobem abruptamente em direção ao Platô Polar cujas elevações superam os 5000 m no pico do maciço Vinson (5140 m), ponto mais alto da Antártica. Por outro lado, a topografia da Cadeia Heritage é muito mais suave e suas elevações decrescem em direção ao sul

onde é composta por uma série de montes e *nunataks* dispersos (Vennum e Nishi, 1992).

Dados climáticos das Montanhas Ellsworth são escassos e bastante variáveis (Vennum e Nishi, 1992). Segundo a estação meteorológica chilena Teniente Parodi nos Montes Patriot, no sul da Cadeia Heritage, as temperaturas médias no verão giram em torno de -15 °C, embora existam relatos de temperaturas de -30 °C em outubro e -5 °C em dezembro. No inverno, as temperaturas médias perpassam os -40 °C (Turner e Pendlebury, 2012). Rubin e Weyant (1965) sugerem que a precipitação média da área oscila entre 150 e 175 mm por ano, em sua maioria em forma de neve.

A espessura do permafrost e da camada ativa são pouco conhecidas, embora as Montanhas Ellsworth estejam inseridas na zona de permafrost contínuo (Campbell e Claridge, 1987). No estudo de Denton et al. (1992), 41% dos 22 perfis coletados, continha permafrost seco dentro dos primeiros 70 cm; 27% tinha permafrost cimentado por gelo dentro dos primeiros 70 cm, 27% apresentava contato lítico dentro dos primeiros 70 cm e 5% continha núcleo de gelo.

O levantamento pedológico foi realizado em duas etapas, uma no verão de 2012 e outra no verão de 2013. Vinte e dois perfis de solo foram coletados, desenvolvidos sobre diferentes litologias e posições na paisagem ao longo das áreas livres de gelo da Geleira Union, na Cadeia Heritage, porção sul das Montanhas Ellsworth. Os solos foram descritos e coletados com base nos critérios estabelecidos por *Antarctic Permafrost and Soils* (ANTPAS, 2006). As feições de crioturbação foram identificadas e classificadas de acordo com Bockheim e Tarnocai (1998). Os perfis foram classificados segundo a *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2010).

A cor do solo seco foi determinada a partir da caderneta de Munsell (1994). A proporção de material grosso (> 2 mm Ø) foi determinada gravimetricamente pela diferença de peso entre a amostra total e a terra fina seca ao ar (TFSA), em laboratório. A textura foi determinada conforme Embrapa (2011), porém, com

agitação lenta conforme indicações de Ruiz (2005). A temperatura dos diferentes horizontes do solo foi medida em campo com termômetro digital tipo espeto.

O pH em água e os teores de cátions trocáveis foram determinados conforme procedimentos indicados pela Embrapa (2011). Fósforo, sódio e potássio disponíveis foram extraídos com Mehlich - 1 (HCl 0,5 mol/L + H₂SO₄ 0,025 mol/L) utilizado a proporção de 1:10 (solo:solução), sendo o fósforo determinado por espectrometria de absorção molecular UV/Visível e o sódio e potássio por fotometria de emissão de chama. A dosagem de cálcio e magnésio foi realizada por espectroscopia de absorção atômica e alumínio trocável por titulometria após a extração com KCl 1 mol/L na relação 1:10 (solo:solução). A acidez potencial (H + Al) foi determinada por titulometria após extração com Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol/L na relação 1:10 (solo:solução) a pH 7,0 (Embrapa, 2011).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação via úmida de acordo com Embrapa (2011). A condutividade elétrica foi determinada no extrato aquoso na relação solo:solução 1:5 (Richards, 1954) e posteriormente corrigida em função da granulometria do solo, segundo indicações de Slavich e Petterson (1993). Os teores de ferro de minerais pedogenéticos foram extraídos com ditionito-citrato (Fe₂O₃dc) (McKeague e Day, 1966). A determinação foi feita por espectroscopia de absorção atômica.

Os teores totais de elementos foram determinados em pastilhas feitas com TFSA maceradas e tamisadas à 200 mesh levadas para análise química em espectrômetro de microfluorescência de raios X por energia dispersiva (μ -EDX-1300 Shimadzu). A quantificação foi baseada nos parâmetros fundamentais com utilização de uma amostra de referência de solo do NIST (Soil II Montana - 2711a), para a calibração dos coeficientes de sensibilidade do equipamento para cada elemento químico.

Para a separação de frações de solo, amostras de TFSA foram agitadas em agitador orbital (tipo Wagner) durante 16 horas com solução de Na₂CO₃ a pH 10,0. A fração areia foi separada por peneiramento e as frações silte e argila pelo método de centrifugação (Jackson, 2005). A fração argila de horizontes selecionados foi submetida à análise de difração de raios X para identificação dos minerais presentes, na linha de difração de raios X em pó (XPD) do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. As

amostras de areia foram analisadas pela mesma técnica em difratômetro Rigaku Radiation Shield com radiação de Co K α , no intervalo entre 4 a 70 °2 θ a 1 passo s⁻¹, com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. Os minerais foram identificados a partir de seus picos característicos com auxílio do banco de dados do programa *Match! 2*[®], por tabelas propostas por Chen (1977) e por meio de informações disponíveis no banco de dados de minerais do site *webmineral*[®].

Foram realizados tratamentos químicos e térmicos nas amostras de argila para detalhar a caracterização dos argilominerais do tipo 2:1. Os tratamentos foram: argila saturada com K⁺, saturada com K⁺ 350 e 550°C, saturada com Mg²⁺ e solvatada com glicerol (Whittig e Allardice, 1986). Na sequência, as amostras foram submetidas à análise em difratometria de raios X.

3. Resultados e discussão

Os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental são muito pedregosos e frequentemente apresentam contato lítico dentro dos primeiros 50 cm de profundidade (Figura 2; Tabela 1). A acumulação de sal é altamente dependente das condições de drenagem local com uma forte predominância em áreas acima dos 900 m de altitude. Essa acumulação ocorre na forma de crostas sobre rochas, abaixo de clastos, na superfície do solo (Figura 3-a), dispersos no perfil ou até mesmo cimentando fracamente um horizonte (Figura 2-d). Além disso, como o sistema é generalizadamente acumulador de sal, é possível observar precipitação em pequenas poças congeladas, notadamente em Edson Hills, Kosco Peak e Conglomerate Ridge (Figura3-b).

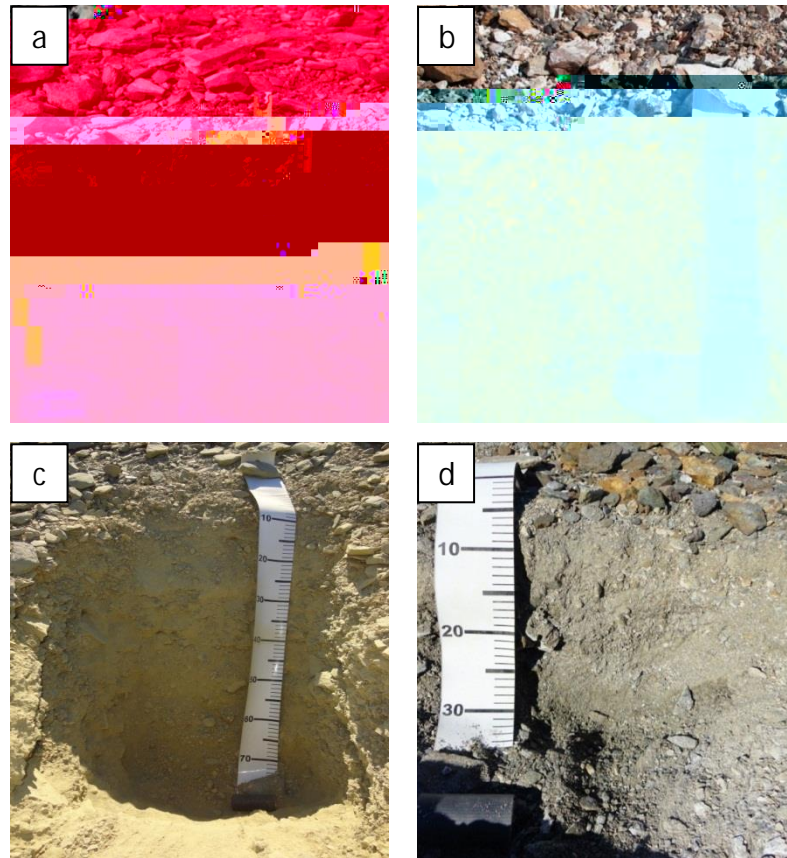


Figura 2. Perfis representativos dos solos desenvolvidos na porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Perfil EL1 sobre quartzitos em Mount Dolence (a); perfil EL5 sobre mármore em Elephant Head (b); perfil EL22 sobre filitos e metavulcânicas em Edson Hills; e perfil EL28 sobre quartzitos e xistos em Conglomerate Ridge, levemente cimentado por sal em 20 cm (d).

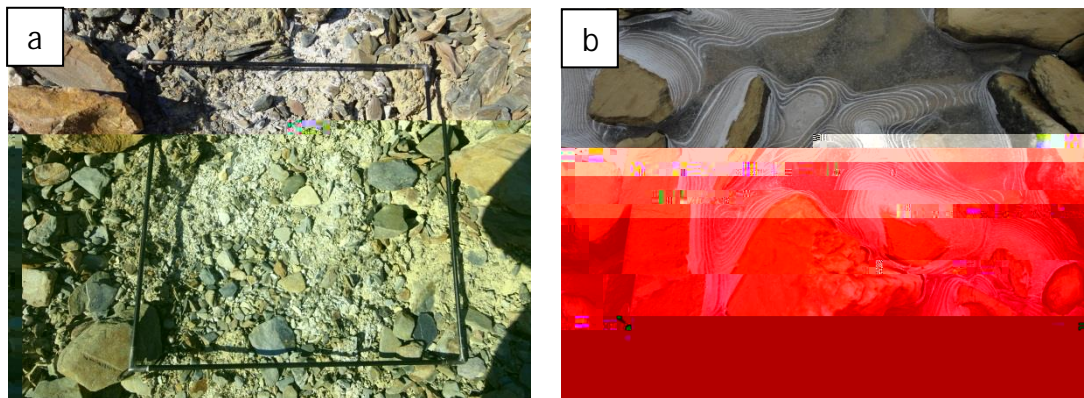


Figura 3. Acumulação de sal na porção sul das Montanhas Ellsworth. Superfície do perfil ELL22 tomada por crostas salinas (a); precipitação de sal em poças congeladas hipersaturadas no vale glacial Edson Hills (b).

Tabela 1. Descrição geral, localização e classificação dos perfis de solos da porção sul das

Os perfis EL7 e EL8 apresentaram intensa colonização por líquens crustosos e musgos, representando a referência de ambiente vegetado na área de estudo (Tabela 1; Figura 4). Além deste, foi observado a presença de uma grande diversidade de espécies de líquens também no fundo do valf02 em Rossmanvalf02

vales ou de áreas morânicas apresentam permafrost cimentado por gelo, dificultando a livre drenagem dentro do perfil. Solos em porções mais elevadas da paisagem possuem permafrost seco e tendem a ser mais bem drenados. O permafrost em Ellsworth é bastante superficial, aparecendo na profundidade máxima de 45 cm. Essas profundidades corroboram as profundidades encontradas em diversos trabalhos desenvolvidos nos vales secos entre as Montanhas Transantárticas (Bockheim, 1979; Bockheim, 1997). Não parece existir relação entre a variação da profundidade do topo do permafrost em Ellsworth e seu conteúdo de umidade (Tabela 1).

É evidente que a real definição da profundidade do permafrost só pode ser conclusiva caso a temperatura do solo seja medida por dois anos consecutivos (Soil Survey Staff, 2010). Entretanto, segundo recomendações recentes do ANTPAS (2006), quando essas medições não são possíveis, recomenda-se avaliar tal parâmetro entre dezembro e janeiro por se tratar do período com as máximas temperaturas na Antártica.

As características morfológicas e físicas dos solos

Figura 5. Exemplos de pavimentos pedregosos formados na porção sul das Montanhas Ellsworth. Superfície do perfil EL19, com predomínio de clastos mais grossos (a); superfície do perfil EL17, com predomínio de clastos menores (b). Quadrante com 50 cm de lado.

Os solos localizados em posições mais baixas da paisagem, como os perfis EL6 (Elephant Head), EL25, EL26 (Kosco Peak), EL27, EL28 (Conglomerate Ridge), os perfis do fundo do vale glacial Edson Hills (EL15, EL17, EL18, EL21) e da moraina lateral também em Edson Hills (EL22), possuem pavimentos pedregosos com menores proporções de nos de rochas e com diâmetros também menores (Figura 5-b).

Esse

Tabela 2. Propriedades morfológicas e físicas e classificação dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade cm	Temperatura °C	Cor do solo seco	Estrutura ¹	Transição	Fração grossa ^{2,6}	Areia ^{3,7}	Silte ^{4,7}	Argila ^{5,7}	Silte + Argila	Classificação textural ⁸
								dag/kg			
EL1 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel											
Cnz	0-6	6,1	5Y 8/2 Amarelo-claro-acinzentado	fr m bla	Gradual e ondulada	90	83	11	6	17	Areia-franca
Cnff1	6-12	-4,5	5Y 8/1 Branco	gs	Gradual e ondulada	40	85	12	3	15	Areia-franca
Cnff2	12-20	-5,6	5Y 8/1 Branco	gs	Gradual e ondulada	30	86	11	3	14	Areia-franca
EL2 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel											
Cn1	0-6	5,2	5Y 7/2 Cinzento-claro	mc	Gradual e ondulada	85	85	12	3	15	Areia-franca
Cn2	6-12	2,1	5Y 6/2 Cinzento-oliváceo-claro	gs	Gradual e ondulada	45	85	13	2	15	Areia-franca
Cnff	12-20	-0,3	5Y 6/2 Cinzento-oliváceo-claro	gs	Gradual e ondulada	40	89	10	1	11	Areia
EL3 Mount Dolence - Lithic Haplorthel											
Cnf1	0-6	-3,5	5Y 7/2 Cinzento-claro	mc	Clara e ondulada	90	87	10	3	13	Areia
Cnf2	6-12	-6,9	5Y 5/2 Cinzento-claro	gs	Clara e irregular	70	89	8	3	11	Areia
EL4 Elephant Head - Lithic Anhyorthel											
Cox	0-6	-	2,5YR 8/2 Branco-rosado	mc	Clara e ondulada	80	75	24	1	25	Areia-franca
Coxz	6-10	-	2,5YR 7/2 Vermelho-claro-acinzentado	gs	Clara e ondulada	60	77	21	2	23	Areia-franca
Coxffz	10-25	-	2,5YR 7/2 Vermelho-claro-acinzentado	gs	Clara e ondulada	60	69	30	1	31	Franco-arenosa
EL5 Elephant Head - Lithic Anhyorthel											

Tabela 2. Propriedades morfológicas e físicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Continuação.

Horizonte	Profundidade cm	Temperatura °C	Cor do solo seco	Estrutura ¹	Transição	Fração grossa ^{2,6}	Areia ^{3,7}	Silte ^{4,7}	Argila ^{5,7}	Silte + Argila	Classificação textural ⁸
						dag/kg					
EL19 - Edson Hills - Lithic Anhyorthel											
Coxz	0-8/10	3,3	5Y 8/4 Amarelo-claro-acinzentado	mo m bla	Difusa e ondulada	52	47	51	2	53	Franco-siltosa

As feições de crioturbação nos solos de Ellsworth são discretas, ocorrendo principalmente em solos com permafrost cimentado por gelo (Tabela 1). Os solos apresentam clastos orientados (EL18, EL21, EL24 e EL26) (Figura 6-a), alguns horizontes-

dag/kg no vale glacial Edson Hills (Tabela 2), representando a natureza pelítica e menos resistente desses substratos. Os solos do vale glacial Edson Hills, em especial, apresentam proporção de fração fina acentuadamente maior que solos de outros ambientes, o que pode indicar a influência de material vulcânico na sua formação. A relação genética entre o solo e o substrato subjacente é extremamente forte por conta do clima de deserto polar (Campbell e Claridge, 1987).

Para Campbell e Claridge (1987), o desenvolvimento da cor em solos de deserto polar é um importante parâmetro do grau de desenvolvimento pedológico. Em áreas de deserto polar, os solos apresentam cores *lithochromic*, ou seja, se as ~~70/72(d)am~~

Tabela 3. Propriedades químicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH ¹	P ² mg/dm ³	K ²	Na ²	Ca ³	Mg ³	Al ³	H+Al ⁴	SB ⁵	t ⁶	T ⁷	V ⁸	ISNa ⁹ %	COT ¹⁰ dag/kg	CE ¹¹ dS/m ³	Fe ₂ O ₃ dc ¹² dag/kg
EL1 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel																	
Cnz	0-6	8,18	273,0	0,47	0,21	1,24	0,21	0,00	0,5	2,13	2,13	2,63	81,0	10,08	0,17	4,0	0,06
Cnff1	6-12	8,59	209,6	0,30	0,07	1,05	0,21	0,00	0,5	1,65	1,65	2,15	76,7	4,82	0,17	1,2	0,06
Cnff2	12-20	8,70	268,9	0,25	0,08	1,03	0,20	0,00	0,3	1,57	1,57	1,87	84,0	5,34	0,00	1,0	0,06
EL2 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel																	

BxO TòHQ ,—@ ð 'fo TòHQ ,—@ E RHQ '†?

as dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Continuação.

P² K² Na² Ca³ Mg³ Al³ H+Al⁴ SB⁵ t⁶ T⁷ V⁸ ISNa⁹ COT¹⁰ CE¹¹ Fe₂O₃dc¹²

Os solos da área de estudo são predominantemente alcalinos, com pH variando de 5,94 e 9,23 (Tabela 3), denotando pouco intemperismo químico. Mesmo os solos que possuem compostos sulfetados passíveis de oxidação no material de origem vulcânico não apresentam acidez marcante em nenhum de seus horizontes. Apenas o horizonte B(s) apresenta

Figura 7. Oxidação de sulfetos do material de origem metavulcânico na porção sul das Montanhas Ellsworth. Piritas oxidando na

de partículas finas e a baixa agregação apresentadas, dificultam sua retenção, proteção física e, conseqüentemente, sua acumulação.

942 Peak e Rossman Cove foram os únicos ambientes colonizados por vegetação na porção sul das Montanhas Ellsworth. Isso pode ser atribuído à maior disponibilidade de água local que impõe maior lixiviação e desfavorece a menor concentração de sal, tal como nos outros ambientes. Além disso, a vegetação nesses locais utiliza o interior das guirlandas de pedra formadas na superfície para se estabelecer, já que ali elas encontram proteção contra os fortes ventos catabáticos e ainda maior concentração de partículas finas.

Predomina Ca no complexo de troca dos solos analisados, seguido pelo Mg, Na e K. Campbell e Claridge (1987) reportam o mesmo comportamento para solos de deserto polar de diversas áreas da Antártica. Ainda nesse trabalho, os autores evidenciam a contribuição de materiais de origens ricos em carbonatos para o incremento de cálcio no complexo de troca (Campbell e Claridge, 1987). O mesmo foi observado para os solos de Ellsworth desenvolvidos sobre mármore, em especial o perfil EL5 (Elephant Head), e conglomerados-mármore com os perfis EL25 (Kosco Peak) e EL27 (Conglomerate Ridge). Embora sejam desenvolvidos sobre filitos e metavulcânicas, os teores de Ca no complexo de trocas dos solos desenvolvidos em Edson Hills são bastante elevados, muitos deles, superiores aos teores dos solos desenvolvidos sobre mármore (Tabela 3). Isso se deve, primeiro, à contribuição de conglomerados-mármore na área de Edson Hills (Webers, et al., 1992a) e, segundo, à maior proporção fina deste ambiente, indicando maior nível de intemperismo e liberação de cátions em solução.

Webers, et al. (1992a) aponta para o elevado *background* de P das rochas de Ellsworth e isso têm influência nos solos. Os teores de P disponíveis são bastante elevados para áreas continentais da Antártica. Os teores são visivelmente superiores em solos desenvolvidos sobre quartzitos, por conta da baixa capacidade desses ambientes em criar sítios de adsorção de fosfatos e de criar pares iônicos, indicando que o conteúdo de P no solo tende a ficar disponível. Por outro lado, nos solos onde os teores de Ca são maiores, é notável o decréscimo da disponibilidade de P em solução, indicando que, possivelmente, P ligado a Ca é o destino final deste ânion.

Corroborando a generalizada acumulação de sal nos solos das Montanhas Ellsworth, os valores de condutividade elétrica (CE) são relativamente altos e mostraram-se sensíveis a mudanças nas condições de acumulação de sal entre os perfis. Os perfis dos fundos de vale - áreas mais protegidas dos ventos - apresentam valores de condutividade elétrica visivelmente maiores que áreas mais expostas à erosão eólica (Tabela 3). Nessas áreas os solos são frequentemente salinos (CE > 4 dS/m; Richards, 1954), ao contrário dos solos das elevações.

Acompanhando o comportamento da condutividade elétrica, o índice de saturação por sódio (ISNa) também mostrou-se sensível a mudanças nas condições de drenagem entre os perfis analisados. Solos menos lixiviados apresentaram maior participação do Na no complexo de troca (maior ISNa, portanto) representando a pequena saída deste íon do sistema, mesmo sendo monovalente (Tabela 3). Embora os valores de ISNa dos solos de Ellsworth sejam relativamente altos, apenas o perfil EL28 (Conglomerate Ridge) apresentou caráter sódico, com ISNa chegando a 16,43 % no horizonte superficial (Richards, 1954; Soil Survey Staff, 2010).

As cargas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth são derivadas essencialmente das cargas permanentes de argilominerais do tipo 2:1, conforme indicam os valores muito próximos de CTC efetiva e potencial. Tais resultados são bastante coerentes, pois as cargas associadas à matéria orgânica são muito pouco representativas, uma vez que os teores de COT não ultrapassam 1% em todos os solos (Tabela 3). Além disso, solos de deserto polar não constituem ambientes compatíveis com expressiva formação de minerais secundários com cargas dependentes de pH.

A composição química total dos solos é fonte de informação sobre sua reserva mineral. É possível observar que os teores de SiO₂, CaO, K₂O e Al₂O₃ dos solos de Ellsworth representam bem a variação e contribuição dos diferentes materiais de origem. Como mostra a Tabela 4, os perfis EL1 e EL2 (Mount Dolence) apresentaram uma predominância de SiO₂ seguidos por Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O demonstrando a forte relação genética com o quartzo, feldspato potássico e mica do material de origem quartzítico (Webers et al., 1992b). Os perfis EL4, EL5 e EL6 (Elephant Head) apresentaram em sua constituição química total clara maioria de CaO representando a forte contribuição do material de origem carbonático (Spörli, 1992).

Tabela 4. Teores totais de elementos na forma de óxidos de amostras selecionadas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil/horizonte	Local	SiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	MnO	Cr ₂ O	CuO	NiO	ZnO
Profundidade (cm)		dag/kg													
EL1 Cnz 0-6	Mount Dolence	78,22	1,29	1,55	3,18	2,11	0,44	2,60	10,07	4,01	4,01	1,51	1,23	0,25	1,10
EL1 Cnff1 6-12	Mount Dolence	77,82	1,80	1,47	3,31	1,37	0,42	2,90	10,29	4,28	4,82	1,06	1,24	0,32	1,25
EL2 Cn1 0-6	Mount Dolence	75,01	3,89	1,39	3,37	1,41	0,50	3,25	10,49	5,05	5,98	1,39	1,19	0,35	1,28
EL2 Cn2 6-20	Mount Dolence	47,12	2,18	1,82	1,88	0,92	0,88	8,12	13,36	1,78	8,71	1,76	1,14	0,17	1,24
EL3 Cnf1 0-10	Mount Dolence	45,04	1,64	1,96	1,63	0,03	0,88	9,06	11,93	1,49	2,66	0,84	1,18	0,18	1,31
EL3 Cnf2 10-30	Mount Dolence	38,49	3,85	1,37	1,51	1,74	0,69	7,47	11,90	1,32	25,45	1,77	1,06	0,00	1,11
EL4 Cox 0-6	Elephant Head	13,94	48,07	1,01	0,92	0,71	0,09	1,13	2,34	1,26	5,29	1,00	0,17	0,65	2,33
EL5 Cox 0-5	Elephant Head	10,46	47,22	0,96	0,72	0,55	0,06	0,84	1,57	0,87	5,19	1,33	0,36	0,65	2,20
EL6 Cn 0-10	Elephant Head	12,59	46,61	1,51	0,77	2,21	0,09	0,76	1,61	1,02	3,39	2,16	0,14	0,58	1,95
EL15 Coxz1 0-5	Edson Hills	61,59	3,27	1,82	2,92	1,34	0,76	7,41	14,42	2,53	10,89	1,52	1,15	0,01	1,71
EL19 Coxz 0-8/10	Edson Hills	79,45	1,12	1,45	2,90	2,14	0,44	2,48	9,48	5,08	4,95	1,00	1,18	0,41	1,27
EL20 Cox1 0-10	Edson Hills	54,43	2,79	2,06	2,90	1,01	0,73	7,46	14,63	2,62	10,41	1,81	1,23	0,15	1,80
EL21 Coxfjj 0-15	Edson Hills	54,07	2,90	1,80	3,07	1,13	0,75	7,68	15,79	2,45	12,17	0,96	1,35	0,27	1,59
EL23 Cnj1 0-5/10	Rossmann Cove	55,43	2,20	2,21	3,30	0,30	0,72	7,10	15,47	2,54	10,45	1,86	1,08	0,02	1,75
EL24 Cnj1 0-10	Rossmann Cove	80,01	0,87	1,39	3,29	1,00	0,46	2,65	9,72	4,93	4,37	1,86	1,20	0,52	1,17
EL25 Coxz 0-25	Kosco Peak	79,35	0,95	1,72	3,34	1,20	0,46	2,58	9,93	4,37	4,65	1,76	1,11	0,36	1,31
EL26 Coxjj 15/20-25	Kosco Peak	56,16	6,83	2,39	2,61	1,12	0,71	6,49	13,73	2,77	9,90	2,19	0,69	0,00	1,73
EL27 Cn 0-10	Conglomerate Ridge	52,39	5,11	2,31	2,50	0,51	0,71	7,41	14,91	2,95	12,15	1,12	0,84	0,11	1,99
EL27 Coxff 10-20	Conglomerate Ridge	51,34	9,80	1,43	2,52	1,68	0,43	4,23	10,52	2,66	10,98	1,15	0,98	0,15	1,60
EL28 Cnm 0-5	Conglomerate Ridge	66,33	5,28	1,81	4,08	1,68	0,60	4,48	15,03	4,32	6,46	1,17	1,18	0,31	1,74
	Número de amostras	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	Teor mínimo	10,46	0,87	0,96	0,72	0,03	0,06	0,76	1,57	0,87	2,66	0,84	0,14	0,00	1,10
	Teor máximo	80,01	48,07	2,39	4,08	2,21	0,88	9,06	15,79	5,08	25,45	2,19	1,35	0,65	2,33
	Teor médio	54,46	9,88	1,67	2,54	1,21	0,54	4,81	10,86	2,92	8,14	1,46	0,99	0,27	1,57
	Coefficiente de variação (%)	40,77	164,67	23,42	38,30	50,46	45,92	57,52	40,78	141,60	48,20	63,18	28,45	36,67	76,75

Com a análise da matriz de correlação entre os teores totais (Tabela 5), é possível verificar que SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO e K_2O apresentam alta correlação entre si por conta da grande proporção de solos desenvolvidos sobre materiais de origem ricos em micas e feldspatos, como quartzitos e filitos. Por outro lado, os teores de CaO apresentaram grande correlação negativa com os teores de SiO_2 e K_2O , indicando a natureza pura dos materiais carbonáticos. A correlação negativa também entre os teores de CaO e MgO indicam a pobreza em magnésio das rochas carbonáticas de Ellsworth e que, a maior parte do magnésio do sistema está alocada em outros minerais não carbonáticos, como micas (Tabela 5).

Tabela 5. Matriz de correlação entre os teores totais de elementos dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
SiO_2		-	-	-	-	-	-	-
CaO	-0,84		-	-	-	-	-	-
MgO	0,27	-0,54		-	-	-	-	-
K_2O	0,90	-0,77	0,39		-	-	-	-
Na_2O	0,25	-0,03	-0,30	0,18		-	-	-
TiO_2	0,38	-0,79	0,76	0,41	-0,30		-	-
Fe_2O_3	0,09	-0,59	0,73	0,15	-0,42	0,94		-
Al_2O_3	0,56	-0,85	0,77	0,68	-0,16	0,91	0,82	

O cálcio corresponde a maior parte da CTC do solo, como já ressaltado. No entanto, em termos totais de elementos, o K_2O aparece em maiores concentrações na maior parte dos solos, excetuando àqueles desenvolvidos sobre mármore (Tabela 4). Esse dado demonstra a maior mobilidade de íons monovalentes na solução do solo. Os teores de Na_2O não se correlacionam com nenhum outro elemento, o que indica baixa contribuição do material de origem para o aporte de sódio ao sistema (Tabela 5). Assim, a presença deste elemento nos solos de Ellsworth pode ser atribuída a fontes externas, como precipitação atmosférica, e não ao intemperismo das rochas.

A grande dificuldade em acumular argila suficiente para realização das análises mineralógicas confirma a natureza esquelética/psamítica dos solos de Ellsworth. A fração areia dos solos analisados é formada por minerais coerentes com a composição química do material parental.

Os perfis desenvolvidos sobre quartzitos apresentaram em sua fração areia os minerais quartzo (0,33; 0,42; 0,24; 0,22 e 0,18 nm); fengita (1,01; 0,44; 0,33; 0,25 e 0,19 nm), feldspato-K (0,33 e 0,42 nm), plagioclásios (0,31 e 0,40 nm) e clorita (1,44; 0,71; 0,34 e 0,27 nm), como mostra a Figura 8. Pela grande intensidade e pequena largura do pico mais proeminente, além de grande variedade de picos provenientes de diferentes planos atômicos de mesmo mineral, é possível confirmar a abundância do quartzo na composição da fração areia dos solos desenvolvidos sobre quartzitos. Secundariamente, aparece a fengita que é um mineral da família das micas, dioctraedral com K entre as camadas, que se difere da muscovita por apresentar ferro e magnésio na camada octaedral (Thompson e Ukrainczyk, 2002).

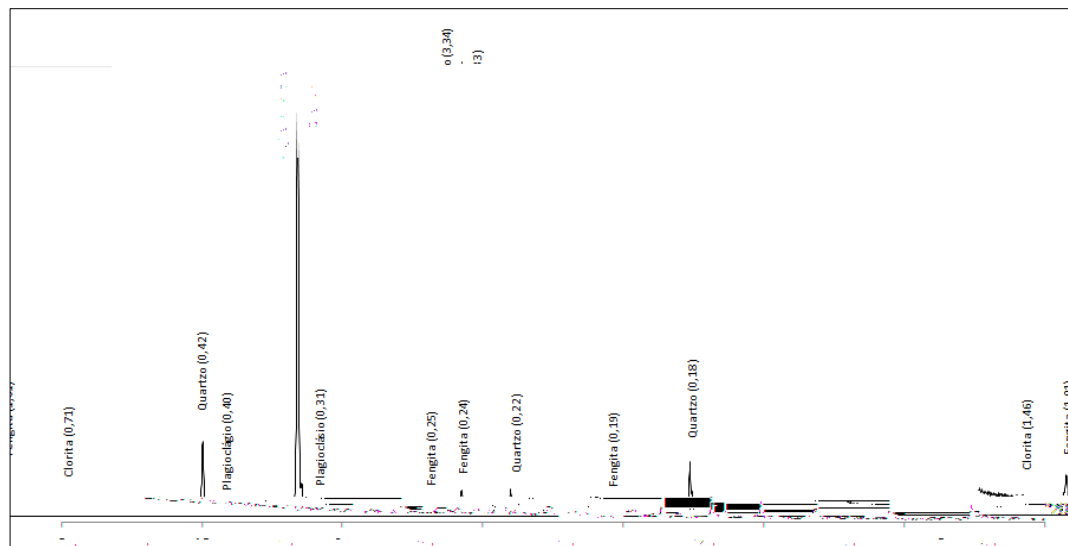


Figura 8. DRX da fração areia do perfil EL3 Cnff1, característico da Sequência Mount Dolence, Montanhas Ellsworth. Espaçamento d em nm.

Observou-se ainda na fração areia a clorita, aluminossilicato hidratado muito comum como mineral acessório em rochas de baixo a médio grau metamórfico (Kohut e Warren, 2002).

Já os perfis desenvolvidos sobre mármore de Elephant Head apresentaram na fração areia o mineral calcita (0,30; 0,38; 0,24; 0,22 e 0,21 nm), dolomita (0,28 e 0,21 nm), feldspato potássico (0,42; 0,33; 0,37 e 0,32 nm), fengita (1,01 e 0,44 nm) e quartzo (0,42 e 0,22 nm) (Figura 9), coerentes com o seu material de origem carbonático com pequena contribuição de quartzitos.

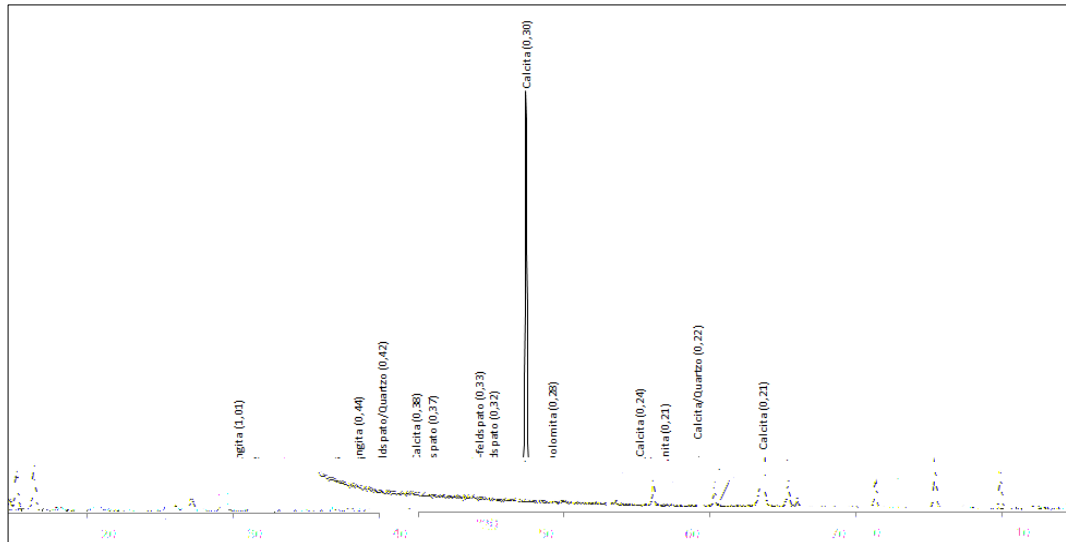


Figura 9. DRX da fração areia do perfil EL5 Cox, característico da Sequência Elephant Head, Montanhas Ellsworth. Espaçamento d em nm.

Os solos desenvolvidos sobre quartzitos da sequência Mount Dolence (EL1, EL2 e EL3) e da sequência Rossman Cove (EL16, EL23 e EL24) apresentaram na fração argila de seus horizontes superficiais os minerais illita (0,99; 0,50 e 0,33 nm), clorita (0,34 e 0,27 nm), quartzo (0,33; 0,24 e 0,22 nm) e halita (0,28; 0,32 e 0,19 nm), como mostra a Figura 10. A diversidade mineralógica da fração argila dos solos desenvolvidos sobre quartzitos não foi sensível às mudanças na posição na paisagem.

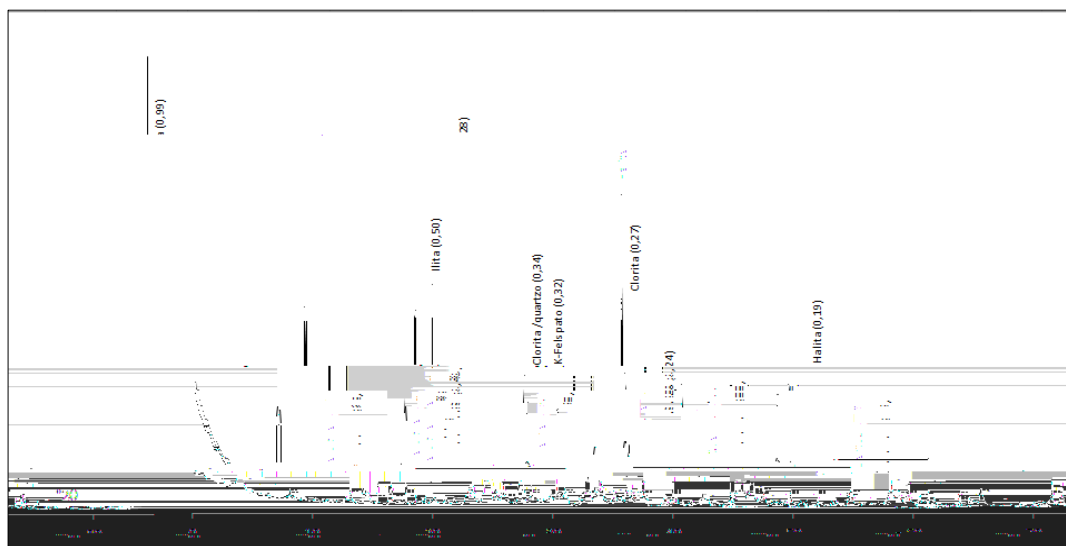


Figura 10. DRX da fração argila do perfil EL3 Cnff1, característico da Sequência Mount Dolence, Montanhas Ellsworth. Espaçamento d em nm.

Os

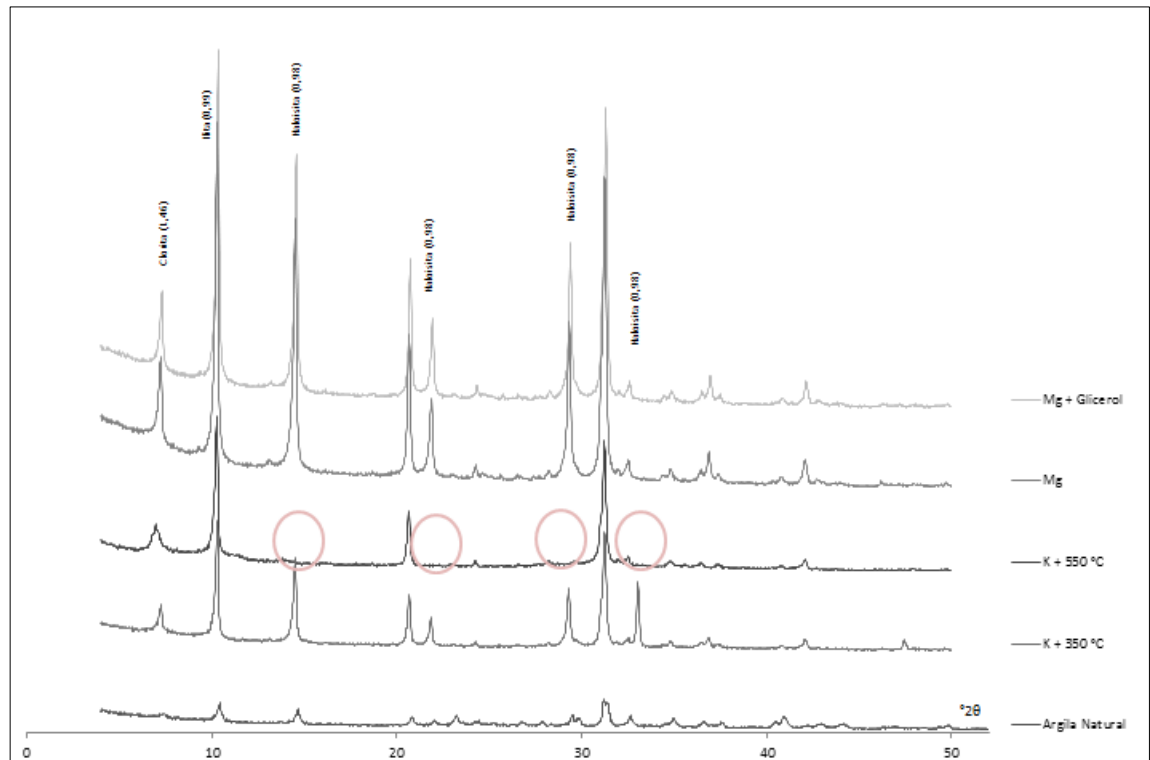


Figura 12. DRX dos tratamentos químicos e térmicos na fração argila perfil EL18 Coxz, característico dos solos do fundo do vale glacial em Edson Hills, Montanhas Ellsworth. Espaçamento d em nm.

A illita é o único mineral presente em todos os solos analisados, e é possível que sua origem seja tanto supergênica quanto pedogenética, assim como a clorita. A origem supergênica desses minerais na fração argila relaciona-se à fragmentação física de minerais micáceos do material de origem, fato reportada por Vennum e Nejedly (1990) em solos da Antártica Ocidental. Já a origem pedogenética desses minerais relaciona-se à neoformação que, no caso da illita, ocorre a partir de soluções ricas em sílica e potássio, situação condizente com os solos desta sequência já que possuem o mineral fengita no material de origem e na fração areia (Thompson e Ukrainczyk, 2002). A neoformação de clorita em solos não é muito comum e restringe-se a solos muito jovens (Kämpf et al., 2009). Considerando as condições climáticas atuais experimentadas por Ellsworth, é coerente assumir que a maior parte das micas que compõem a fração argila destes solos está relacionada ao primeiro caso, assim como em outros solos de deserto polar da Antártica (Bockheim, 1997).

A presença de haloisita é bastante coerente como o produto do intemperismo químico de micas em ambientes áridos (White e Dixon, 2002; Melo e Wypych, 2009). Além disso, este mineral também foi detectado nos solos derivados de filitos com

influência de metavulcânicas básicas, em Edson Hills (EL15, EL17, EL18 e EL21). Ambientes com influência vulcânica básica são favoráveis a sua formação deste mineral (Dixon, 1989; Simas et al., 2006; Mendonça et al., 2012). A identificação da haloisita não é muito simples em solos que contém minerais micáceos, já que muitos picos desses minerais são coincidentes (Amonette, 2002). A detecção da haloisita só foi possível graças aos tratamentos térmicos, onde vários picos deste mineral colapsaram quando a amostra foi aquecida a 550 °C (Figura 12). A presença do mineral haloisita hidratada e possível ocorrência de illita e clorita pedogenética nos solos estudados indica que, mesmo incipiente, processos de alteração química ocorrem no ambiente do solo.

Embora não detectado nos difratogramas, é muito possível que fases minerais menos cristalinas intermediárias entre minerais micáceos e a haloisita componham a fração argila dos solos de Ellsworth devido à aridez extrema e fontes de sílica e alumina em abundância (Harsh et al., 2002). No entanto, devido à baixa cristalinidade dessas fases minerais, a difratometria de raios X não é a técnica mais adequada para sua detecção, cabendo trabalhos mais detalhados para confirmar tal hipótese.

A mineralogia da fração argila dos horizontes superficiais dos solos analisados corrobora a natureza quimicamente pouco alterada dos solos desenvolvidos sob clima de deserto polar. A presença de minerais primários intemperizáveis na fração argila como illita, clorita, feldspatos potássicos e quartzo também foi reportada em solos pouco intemperizados da Antártica Marítima (Mendonça et al., 2012; Simas et al., 2006); do Mar de Weddell (Pereira et al., 2013; Souza et al., 2014; Schaefer et al., 2015) e dos vales secos entre as Montanhas Transantárticas (Bockheim, 1980; Vennum e Nejedly, 1990).

4. Conclusões

Os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth possuem características típicas de solos de deserto polar e se assemelham com solos de outras regiões desérticas da Antártica. São, de forma geral, esqueléticos/psamíticos, pouco profundos, com desenvolvimento incipiente de estrutura e com baixos valores de cromas. Todos os solos acumulam sal em maior ou menor grau, a depender das condições de drenagem locais e exposição de suas superfícies; possuem pavimento pedregoso e apresentam

discretas, porém típicas, feições de crioturbação. A reatividade dos solos de Ellsworth é altamente dependente dos teores de fração fina devido à inexpressiva quantidade de argila e matéria orgânica dos solos.

Foi proposto um modelo para a gênese da estrutura dos solos de deserto polar, que, a partir do qual, estrutura em blocos, maciça e em grãos simples forma-se em função da presença de ciclos de congelamento e descongelamento e sais.

Embora alguns solos de Ellsworth sejam desenvolvidos sobre material parental rico em sulfetos (passíveis de oxidação, portanto) este processo se dá de forma bastante incipiente, incapaz de refletir no rebaixamento no pH e intemperismo químico como em outras regiões da Antártica. Apesar disso, os solos com alguma influência vulcânica apresentam cores com valores de cromas anormalmente elevados para os solos desenvolvidos na porção sul das Montanhas Ellsworth.

A colonização pela vegetação em Ellsworth mostrou-se bastante dependente da maior disponibilidade de água, menor salinidade e da presença de guirlandas de pedra na superfície do solo capazes de proteger os líquens contra a ação erosiva dos fortes ventos catabáticos.

A mineralogia dos solos de Ellsworth demonstra a grande relação genética entre os solos e os materiais de origem. Entretanto, a assembleia mineralógica dos solos analisados não apresentou grande variação entre os diferentes materiais parentais, já que o clima extremamente frio e severamente árido determina baixos níveis de intemperismo químico e pedogênese. O intemperismo e a pedogênese nas Montanhas Ellsworth estão altamente condicionadas ao clima e à natureza recente das superfícies de alteração locais.

Referências Bibliográficas

Amonette, J. 2002. Methods for Determination of Mineralogy and Environmental Availability. In: Dixon, J.B, Schulze, D.G. (Co-Ed.). Soil mineralogy with environmental applications. Soil Science Society of America Book Series no. 7. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 153-197.

Antarctic Permafrost and Soils - ANTPAS, 2006. Soil description manual - guide for describing, sampling, analyzing, and classifying soils of the Antarctic region. <http://erth.waikato.ac.nz/antpas> (accessed 19 Dec 2012).

Beyer, L., Bockheim, J.G., Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., 1999. Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols. *Antarctic Science* 11 (4), 387-398.

Bockheim, J.G., 1979. Relative age and origin of soils in eastern Wright Valley, Antarctica. *Soil Sci.* 121>118, 142–152.

Bockheim, J.G., 19 Properties and classification of soe desert soils in coarse-texturd glacial drift in the Artic an Antarctic. *Geoderma* 24, 45-69.

Bockheim, J.G., 1990. Soil development rates in the Transantarctic Mountais. *Geoderma* 47, 59-77.

Bockheim, J.G., 19 Properties and classification of Cold Desert soils from Antarctica. *Sci. Soc.eas(n)3(d)U/fo0000e>4<00*

J.G., 1990. Soil

Collinson, J.W., Vavra, C.L., Zawiskie, J.M., 1992. Sedimentology of Polarstar Formation (Permian), Ellsworth Mountains, West Antarctic. In: Webers, G.F., Craddock, C., Splettstoesser, J.F. (Eds), *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic*. Boulder, Geological Society of America, Memoir 170, Colorado, pp. 63-80.

Dalziel, I.W.D., 2007. The Ellsworth Mountains: Critical and Enduringly Enigmatic. In: Cooper, A.K., Raymond, C. R., *Antarctica: A Keystone in a Changing World – Online Proceedings of the 10th ISAES*, USGS Open-File Report 2007-1047, Short Research Paper 004.

Denton, G.H., Bockheim, J.G., Rutford, 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, Memoir 170, Boulder, Colorado, pp. 403-432.

Dixon, J.B., 1989. Kaolin and Serpentine Group Minerals. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Co-Eds.). *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America Book Series no. 1. Soil

Michel, R.F.M., Schaefer, C.E.G.R., Dias, L., Simas, F.N.B., Benites, V., Mendonça, E.S., 2006. Ornithogenic gelsols (cryosols) from Maritime Antarctica: pedogenesis, vegetation and carbon studies. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1370–1376.

Munsell. 1994. Soil color charts. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, Baltimore.

Navas, A., López-Martínez, J., Casas, J., Machín, J., Dúran, J.J., Serrano, E., Cuchi, J.A., Mink, S., 2008. Soil characteristics on varying lithological substrates in the South Shetland Islands, maritime Antarctica. *Geoderma* 144, 123-139.

Nicholas, H., Scafefer, C.E.G.R., Bockheim, J.G., Pereira, T.T.C., 2015. Soils of Graham and Palmer Lands, Antarctic Peninsula. In: Bockheim, J.G. (Ed), *The Soils of Antarctica*. World Soils Book Series. Springer, Switzerland, pp. 205-225.

Pereira, T.C., Schaefer, C.E.G.R., Ker, J.C., Almeida, C.C., Almeida, I.C.C., Pereira, A.B., 2013. Genesis, mineralogy and ecological significance of ornithonic soils from a semi-desert polar landscape at Hope Bay, Antarctic Peninsula. *Geoderma* 209-210, 98-109.

Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and alkali Soils*. United States Department of Agriculture: Washington. (Agriculture Handbook No. 60)

Rubin. M.C., Weyant, W.S., 1965. Antarctic Meteorology. In: Hatherton, T. (Ed.). *Antarctica*. Wellington 0011120001>01/16

Simas,

Spörli, 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, Memoir 170, Boulder, Colorado, pp. 21–35.

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

Tedrow, J.C.F., Ugolini, F.C., 1966. Antarctic soils. In: Tedrow, J.C.F. (Ed.), *Antarctic soils and soil formation processes*. Antarctic Res. Ser., vol. 8. American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 161–177.

Thompson, M., Ukrainczyk, L., 2002. Micas. In: Dixon, J. B.; Schulze, D. G. (Co Eds.). *Soil mineralogy with environmental applications*. Soil Science Society of America Book Series no. 7. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 431–466.

Turner, J., Pendlebury, S. (Eds.), 2012. *The International Antarctic Weather Forecasting Handbook*. http://www.antarctica.ac.uk/met/momu/International_Antarctic_Weather_Forecasting_Handbook/index.php. Accessed at December 15.

Vennum, W.R.; Nejedly, J.W. 1990. Clay mineralogy of soils developed on weathered igneous rocks, West Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 33, 579–584.

Vennum, R.W., Nishi, J.M., 1992. Chemical weathering of Cu, Fe and Pb sulfides, southern Ellsworth Mountains, West Antarctica. In: Webers, G.F., Craddock, C.; Splettstoesser, J.F. (Eds.). *Geology and Paleontology of the Ellsworth Mountains, West Antarctic*: Geological Society of America, Memoir 170, Boulder, Colorado, pp. 433–441.

Webers, G.F.; Craddock, C.; Splettstoesser, J.F., 1992a. 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, Memoir 170, Boulder, Colorado, pp. 1–8.

Webers, G.F.; Bauer, R.L.; Anderson, J.M.; Buggisch, W.; Ojakangas, R.W.; Spörli, K.B. 1992b. The Heritage Group 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, Memoir 170, Boulder, Colorado, pp. 9–19.

White, B.N., Dixon, J.B., 2002. Kaolin–Serpentine Minerals. In: Dixon, J. B.; Schulze, D. G. (Co Eds.). *Soil mineralogy with environmental applications*. Soil Science Society of America Book Series no. 7. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp. 389–414.

Whittig, L.D., Allardice, W.R., 1986. X Ray diffraction techniques. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part

CAPÍTULO 2

Interações pedogeomorfológicas no vale glacial dos Montes Edson, Montanhas
Ellsworth, Antártica Continental

RESUMO

SOUZA, Caroline Delpupo. Interações pedogeomorfológicas no vale glacial dos Montes Edson, Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Viçosa: UFV, 2015. Cap. 2 (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

Foram identificadas as principais unidades de relevo do vale glacial dos Montes Edson, Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Foram analisados os solos existentes. Os solos foram analisados segundo suas propriedades morfológicas, físicas e químicas; quanto à sua salinidade, pedregosidade superficial, classificação pedogenética e classificação quanto ao estágio de intemperismo. Encostas de detritos com movimento lento, encostas de detritos com movimento acelerado, encostas escarpadas, circos glaciais, depósitos de tálus,

1. Introdução

As Montanhas Ellsworth possuem 2095 km² de áreas livres de gelo, o que corresponde a 4,2 % do total da Antártica (49500 km²). Esta região é chave para o estudo da história glacial da Antártica já que está muito próxima ao limite atual do manto de gelo da Antártica Ocidental e da plataforma de gelo Ronne-Filchner (Denton et al., 1992).

Denton et al. (1992) observaram duas principais feições de erosão glacial na região das Montanhas Ellsworth. Montanhas expostas apresentam clássicas feições de erosão glacial alpina, como *horns*, *arêtes* e *sharp spurs*. Essas feições são especialmente evidentes na região mais setentrional das Montanhas Ellsworth, a chamada Cadeia Sentinel, mas também estão presentes na Cadeia Heritage, ao sul. A segunda feição de erosão glacial é a chamada linha de corte glacial (*trimline*), marcada nas serras e montes por toda a extensão das Montanhas Ellsworth. As cristas acima da linha de corte são afiadas e pontiagudas; enquanto que abaixo da linha de corte esse padrão é substituído por superfícies de polimento e estriamento glacial. Depósitos glaciais e diversos blocos erráticos ocorrem abaixo da linha de corte. A partir da interpretação da paisagem glacial de Ellsworth, associada às características do modelo de alteração superficial e feições pedológicas, Denton et al., 1992 acreditam que a expansão do gelo se deu durante o Wisconsin (36-0001) e Tertiary (3T(a)3ra)9(d)4io/ a Antártica (24,) (0001) Tertiary (324(eist(e) (0001) Tertiary (325(u)5(ma) mit3riais u35(e) (0001) Tertiary (458(l)9htes drnam or u64(d)4(os) (0001) Tertiary on5es deinteo7((p)4(re67(t)4(ação) (0001) Tertiary (135(d)3(a) (0001) Tertiary u43(d)5(os) (0001) Tertiary (45(p)4(ed)3oeróctos , moeróctos a paisaD1m antártcta são st1m (53(m) (0001) Tertiary (24(ár)8(ea)3(s) (0001) Tertiary (512(livre67(s) (0001) Tertiary (43(a) (0001) Tertiary (824(An)4(t)4(ár)8(t)4(cal.) (0001) Tertiary (59ht) (0001) Tertiary (293(an)43(e)93(a) (0001) Tertiary (0.8 fma dtnhada a

porção mais meridional das Montanhas Ellsworth. Nenhum trabalho detalhado das interações pedogeomorfológicas na região da Geleira Union havia sido desenvolvido até o momento.

Nesse sentido, esse trabalho buscou analisar as interações pedogeomorfológicas existentes no vale glacial dos Montes Edson, porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental, contribuindo para o conhecimento da região.

Figura 1: Montanhas Ellsworth no contexto do continente antártico (a); Área da Geleira Union no contexto das Montanhas Ellsworth (b); Montes Edson no contexto da área da Geleira Union (c); fotografia aérea não ortorretificada do vale glacial rochoso dos Montes Edson (d).

O vale glacial dos Montes Edson é uma das áreas de litologia mais diversa das Montanhas Ellsworth. É cortado ortogonalmente por três formações geológicas: (i) Formação Drake Icefall composta por xisuma

A primeira manifestação glacial em Ellsworth se deu em forma alpina que, posteriormente se tornou continental (Campbell e Claridge, 1987). Esses autores acreditam que a maior parte da topografia atual data da fase de glaciação alpina, já que devido à presença de temperaturas mais amenas que as épocas subseqüentes, os glaciares de base úmida detinham maior poder erosivo. Rutherford et al. (1980) afirmam que esta glaciação iniciou possivelmente no al.

trabalho de delimitação foi realizado no Laboratório de Geografia Física Aplicada da Universidade Federal de Viçosa.

Dez perfis de solo foram descritos e coletados na área de estudo, considerando as unidades de relevo identificadas na área. As amostras de solo foram descritas e coletadas com base nos critérios estabelecidos por Antarctic Permafrost and Soils (ANTPAS, 2006). As feições de crioturbação foram identificadas e classificadas de acordo com Bockheim e Tarnocai (1998). Os perfis foram classificados segundo a *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2010).

As amostras foram caracterizadas física e quimicamente.

As atividades de campo foram realizadas durante as expedições do Núcleo Terrantar à Antártica Continental, nos verões de 2012/2013 e 2013/2014.

4. Resultados e discussão

4.1. Unidades de relevo e processos associados: aspectos gerais

O vale glacial dos Montes Edson foi compartimentado em três conjuntos de unidades de relevo distintas: (i) glacial rochoso e feições associadas; (ii) sistema deposicional morânico; e (iii) solos com padrões. As feições relacionadas ao glacial rochoso são predominantemente paraglaciais produzidas devido a recente exposição de superfícies anteriormente glaciadas (Rutford et al., 1980; Denton et al., 1992). As feições morânicas são formadas por processos deposicionais a partir de geleiras e constituem geoformas supraglaciais. Os solos com padrões são processos periglaciais e estão estritamente relacionados à dinâmica de deglaciação do gelo azul. Todas as feições estão relacionadas às variações do manto de gelo da Antártica Ocidental.

A partir dos três compartimentos, treze unidades geomorfológicas foram identificadas (Figura 2). Os neveiros constituem uma unidade separada já que é virtualmente impossível inferir as unidades de relevo subjacentes a eles. Pelo fato de a identificação não ter sido feita sobre uma imagem de satélite georreferenciada, não é possível determinar a área de cada uma das unidades. No entanto, ficou evidente a predominância das feições erosivas, notadamente as encostas de detritos com movimento lento, seguida pelas encostas de detritos com movimento acelerado. Apesar de menos frequentes, as feições relacionadas ao sistema morânico e solos com padrões representam os processos periglaciais na área. Segundo Vieira e Simões (2011), os processos de vertentes associadas à geleira rochosa nas Montanhas Ellsworth são caracterizadas por uma paisagem com feições erosivas e deposicionais.

O vale glacial é limitado ao norte por encostas abruptas que culminam no Pico Lester (1447 m). Geomorfologicamente, esse conjunto de feições pode ser entendido como feições residuais de erosão glacial. O Pico Lester é na verdade um *horn*, de forma piramidal, bordada por circos glaciais esvaziados (Figura 3-a). Já as cristas que descem do ponto mais alto são chamadas de arêtes. Essas feições residuais representam testemunhos de locais onde o gelo do Último Máximo Glacial não cobriu. Isso fica evidente devido à forma afiada e pontuda das feições, típico resultado de abrasão, faturamento e esfrelamento provocados pelo gelo em montanhas glaciadas (Huggett, 2011).

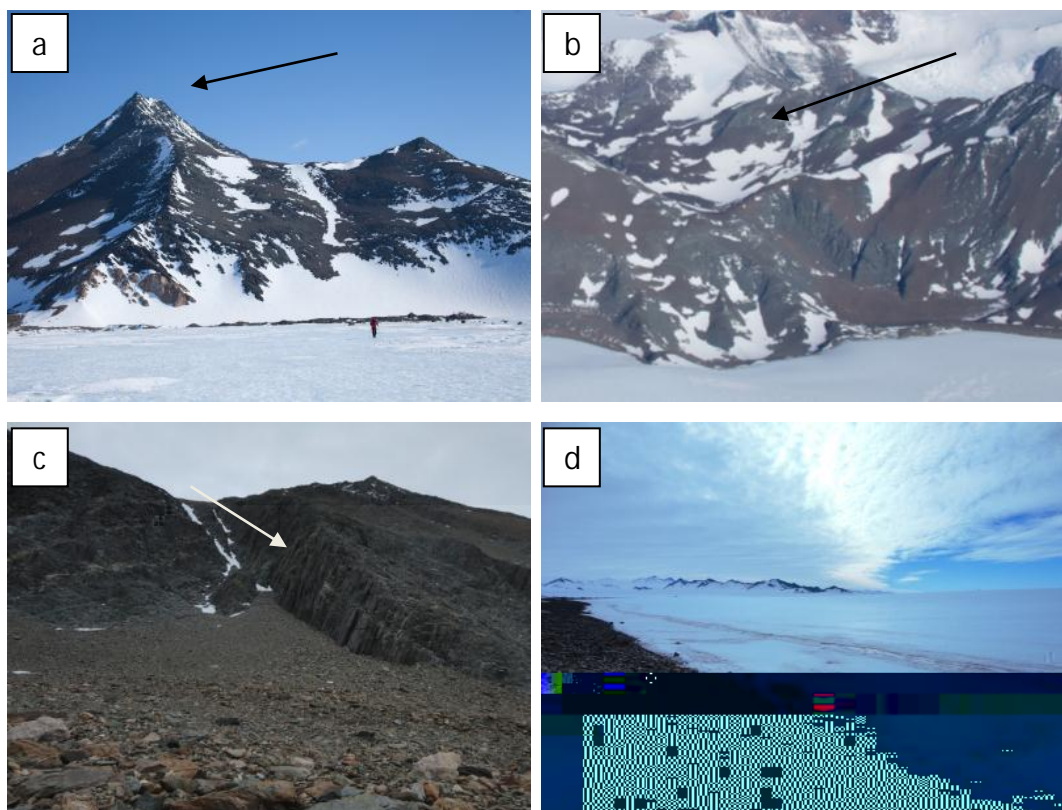


Figura 3: Pico Lester (a); conjunto de circos glaciais (b); encostas escarpadas (c); área de gelo azul (d).

As encostas ao sul são mais suaves e compostas por um extenso conjunto de circos glaciais coalescido que formam uma espécie de vale suspenso (Figura 3-b). Circos glaciais são feições formadas por erosão subglacial, ou seja, pelo poder erosivo da base da antiga geleira que cobriu a área. Um circo é a cabeceira de um vale glacial, com a parte superior das paredes quase verticalizada e uma base aplainada com a concavidade bem aberta. São circulares ou semicirculares e podem acumular ou não

neve nos dias atuais (Huggett, 2011). O conjunto de circos glaciais coslescidos que compõe as encostas mais ao sul ainda acumula neve e possui um pequeno lago formado pela água de degelo, devido à sua forma circular e fechada. Já em outros circos glaciais presentes na área, a acumulação de neve é bastante limitada pela elevada declividade. A presença dos circos glaciares representa indicador indiscutível de glaciação na área e mostra com detalhamento local a linha de neve regional (Huggett, 2011).

Tanto as cristas ao norte, quanto os circos glaciais ao sul, limitam-se com o interior do vale a partir de encostas escarpadas (Figura 3-c). Um claro lineamento quase norte-sul destas escarpas revela sua natureza estrutural, possivelmente por marcar contatos litológicos. Essas encostas escarpadas contribuem com sedimentos para o interior do vale, depositando grandes fragmentos de rocha fresca, formando os chamados *rock falls*, frequentemente reportados em

Antártica Continental (Bockheim, 1980; Campbell e Claridge, 1987; Bockheim, 1997; Beyer et al., 1999; Bockheim, 2002; Bockheim e McLeod, 2006; McLeod et al., 2009; Bockheim, 2010).

Morfologicamente, os solos são em sua maioria rasos, com pouca

Tabela 2. Propriedades morfológicas e físicas dos solos do vale glacial dos Montes Edson, porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade cm	Temperatura °C	Cor do solo seco	Estrutura ¹	Transição	Fração grossa ^{2,6}	Areia ^{3,7}	Silte ^{4,7}	Argila ^{5,7}	Classificação textural ⁸
						dag/kg				
EL12 - Glacic Haploturbel										
Coxf	0-5	0,4	5Y 5/2 Cinzento-oliváceo	fr m bla	Difusa e ondulada	50	88	9	4	Areia
Coxf	5-15	-0,5	5Y 6/1 Cinzento-oliváceo	mc	Difusa e ondulada	30	78	21	1	Areia-franca
EL13 - Typic Anhyorthel										

Todos os solos possuem pH

Tabela 3. Propriedades químicas dos solos do vale glacial dos Montes Edson, porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH ¹	P ² mg/dm ³	K ²	Na ²	Ca ³	Mg ³	Al ³	H+Al ⁴	SB ⁵	t ⁶	T ⁷	V ⁸	ISNa ⁹	COT ¹⁰	CE ¹¹	Fe ₂ O ₃ dc ¹²
-----------	----------------------	-----------------	--------------------------------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-------------------	-----------------	----------------	----------------	----------------	-------------------	-------------------	------------------	---

Tabela 4. Estágio morfo genético, estágio de sal, classificação pedogenética e

das baixíssimas temperaturas experimentadas durante todo o ano e da limitada oferta de umidade, o fluxo de detritos se dá a partir de movimentos decorrentes das variações de temperatura horizontais e verticais produzidas pela incidência diferencial de radiação e ventos. Esse comportamento foi reportado por Vieira e Simões (2011) nos Montes Independence e Patriot, também no sul das Montanhas Ellsworth.

Três perfis de solo foram coletados sobre estas unidades. Os perfis EL19 e EL20 foram coletados sobre EDML, sendo o primeiro nas encostas do norte (face Pico Lester) e o segundo, nas encostas do sul (face circo glacial). Já o perfil EL14 representa uma EDMA do sul (face circo glacial). Os solos desenvolvidos em ambas as unidades são solos com contato lítico fragmentário a 20 e 15 cm, respectivamente. Devido à maior exposição à radiação solar, os solos desenvolvidos sobre as EDML apresentam as maiores temperaturas dentre todos os solos analisados (Tabela 2). Nesses solos, o permafrost seco não foi identificado dentro do solo, mas sim dentro da camada de rocha fragmentada subjacente. Por outro lado, o solo desenvolvido sobre a EDMA apresentou temperaturas negativas (permafrost seco) ainda dentro do perfil, devido à sua menor profundidade. Nenhuma feição de crioturbação foi identificada, já que estas unidades ocupam cotas altimétricas mais elevadas na paisagem, áreas acima do nível de influência das zonas de ablação.

Em relação ao padrão de pavimento pedregoso, foi possível observar que os solos desenvolvidos sobre EDML possuem pequena capacidade de redução de tamanho de clastos superficiais quando comparados aos solos de outras unidades de relevo. Isso é observado pela grande proporção de clastos das classes de tamanho calhau em relação ao conteúdo de cascalho, além de baixos níveis de intemperismo cavernoso, oxidação e arredondamento dos clastos. Por outro lado, a capacidade de redução de tamanho de clastos das superfícies sobre as EDMA é ainda menor, evidente a partir da maior proporção de matacões no pavimento pedregoso do perfil EL14 (Tabela 1). Isso se deve ao menor tempo de permanência dos clastos nas EDMA graças à maior declividade.

Quanto à capacidade de acumular sal, ambas as unidades são altamente dependentes da exposição aos ventos predominantes. Tanto as EDML quanto as EDMA da porção mais ao norte acumulam mais sal do que as encostas da porção ao sul. Assim, embora os três perfis enquadrem-se na mesma classe de solos (Lithic

Anhyorthel), a capacidade de acumular sal os diferenciou segundo o estágio de sal e de intemperismo (Tabela 4).

4.3.2. Depósitos de tálus

Os depósitos de tálus são formados pelas *rockfalls* e são amplamente presentes na área do vale glacial dos Montes Edson (Figura 2). Eles são especialmente frequentes ao longo de toda margem das EDML que culminam no Pico Lester, na porção mais ao norte (Figura 5-a). Além disso, aparecem abaixo das EDMA e encostas escarpadas do interior do vale glacial (Figura 5-b). Os depósitos de tálus do setor norte - na base do Pico Lester - representam uma zona de contato entre os sedimentos paraglaciais provenientes das encostas de detritos com os sedimentos periglaciais morânicos, o que revela intensa atividade deposicional neste setor.

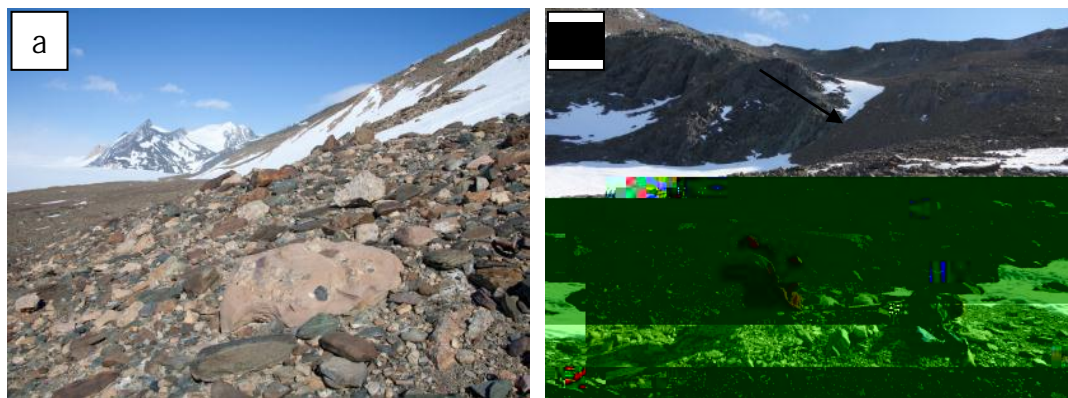


Figura 5: Depósito de tálus na interface da moraina hummocky e encostas do Pico Lester (a) na parte interna do vale glacial (b).

Os depósitos de tálus associados às EDML possuem fragmentos de rocha mais arredondados e em tamanhos ligeiramente menores, haja vista que percorrem um caminho maior ao longo da superfície da encosta até serem depositados. Por outro lado, os depósitos de tálus associados às EDMA e às encostas escarpadas possuem fragmentos de rochas mais angulosos e maiores, já que a velocidade de transporte desde a fonte do sedimento até o local de depósito é menor.

O perfil EL13, coletado na base da encosta que culmina no Pico Leste, representa os depósitos de tálus. A natureza esquelética das áreas de depósito de tálus é evidenciada pelo predomínio de fragmentos grossos deste perfil (Tabela 2). Além disso, o pavimento pedregoso desenvolvido neste perfil possui baixíssima

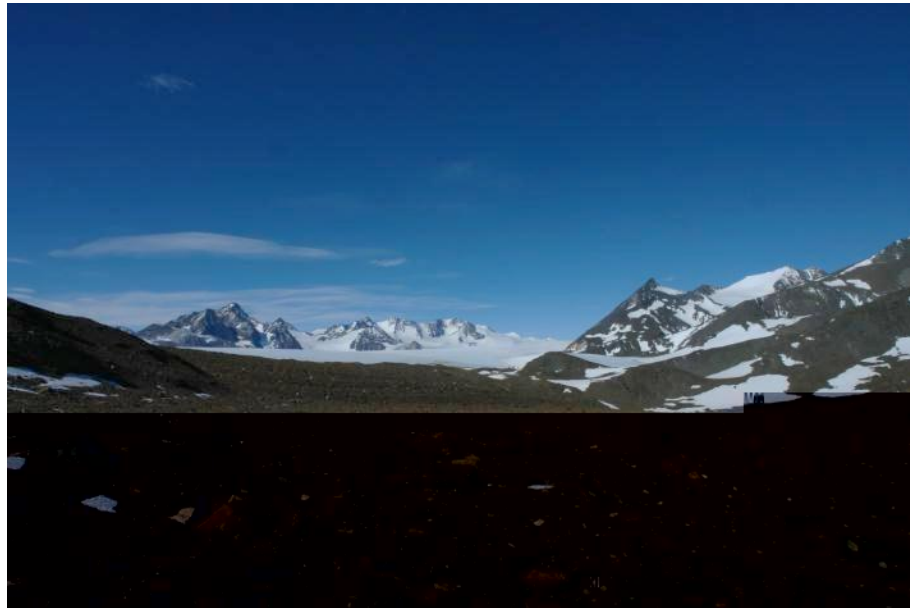


Figura 6: Campo de solos poligonais.

Os padrões de superfície encontrados restringem-se a polígonos com materiais não selecionados ou fracamente selecionados. Nas áreas onde ocorre segregação de sedimentos, foram formados polígonos com materiais mais grossos nas bordas e materiais mais finos no centro, na superfície. As áreas à montante do vale possuem polígonos com clastos maiores e menos selecionados, possivelmente pela contribuição da sedimentação de encostas. Por outro lado, as áreas à jusante do vale possuem clastos menores e com pouca variação de tamanho. Além disso, os polígonos da porção mais montante do vale são mais irregulares e, os da porção mais jusante, são mais bem formados. Isso se deve a dois fatores: (i) um pequeno gradiente altitudinal, fazendo com que o permafrost seja mais superficial e atue mais ativamente na saída do vale; e (ii) as áreas à jusante do vale são mais planas que as áreas à montante, onde os depósitos de encosta formam áreas mais inclinadas, condição determinante para a formação de padrões em superfície (Huggett, 2011).

Os perfis EL15, EL17, EL18 e EL21 representam a feição periglacial de solos com padrões. Esses solos se diferenciam dos outros pelo menor conteúdo de fragmentos grosso (> 2 mm) e pela maior proporção de material fino (silte + argila), demonstrando maior nível de alteração do substrato subjacente. Além disso, estes solos possuem traços mais marcantes de oxidação, visíveis nos valores de cromas identificados, que acompanham a elevação dos teores de Fe_2O_3dc advindos de minerais pedogenéticos (Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente). De forma geral, eles também apresentam

maior desenvolvimento de estrutura, atribuído à maior proporção de material fino, maior acumulação de sal (agente cimentante) e aos ciclos de umedecimento e secagem.

A maioria dos solos com padrões apresenta boa capacidade de redução de tamanho de clastos em seus pavimentos pedregosos, tendo calhau e cascalhos como predominantes, respectivamente (Tabela 1). A área tem maior capacidade de acumulação de sal, pois, embora estejam sujeitos à maior umidade, o permafrost cimentado por gelo impede a livre drenagem. Além disso, como se constituem em uma depressão, a erosão eólica é menos severa que nas porções mais elevadas. Por fim, os próprios polígonos contribuem para a proteção física ao sal, uma vez que formam microdepressões. Esse panorama geral de acumulação de sal se reflete nos elevados valores de condutividade elétrica encontrados nesses solos (Tabela 3).

Esta unidade apresentou a maior homogeneidade em relação à classificação dos solos que a compõe, sendo, portanto, a unidade de relevo determinante para as características dos solos, portanto. Todos os solos foram enquadrados na classe Typic Haploturbel, por apresentarem feições de crioturbação, e foram classificados no estágio 4 de acumulação de sal e no estágio 3 de intemperismo (Tabela 4).

4.3.4. Moraina supraglacial lateral e moraina hummocky

Toda a porção leste do vale glacial é bordada por um extenso conjunto de morainas que se constituem feições deposicionais tipicamente supraglaciais (Figura 2). Este cordão morânico possui centenas de metros de comprimento e dezenas de metros largura e é classificado como moraina lateral, já que está localizado no limite entre a Geleira Union e as encostas do vale glacial, de forma paralela. A extremidade norte desta moraina lateral converge a outro sistema morânico também lateral, advindo da Geleira Hyde, formando uma só moraina medial em forma de espigão (*spur*) que invade a área de gelo azul (Figura 7-a).

Figura 7: Extremidade da moraina hummocky e formação da moraina medial (a); feição de crioturbação (b); poça congelada (c) e *termokarst* amparando um errático (d).

Como em outras regiões glaciadas do mundo,

Union, ficando também mais lenta a deposição de sedimentos em um mesmo local. Formou-se assim uma moraina mais larga, mais baixa e

moraina supraglacial na zona-vale, enquanto o perfil EL12 é representativo da moraina hummocky da zona-encosta.

O pavimento pedregoso do perfil EL12 é composto por fragmentos menos arredondados que o pavimento de EL22. Isso se deve à deposição mais lenta dos sedimentos presentes na devemoraina

5. Conclusões

A geomorfologia da área do vale glacial dos Montes Edson pode ser entendida a partir de três conjuntos de unidades de relevo distintas: (i)

Beyer, L., Bockheim, J.G., Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., 1999. Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols. *Antarctic Science* 11 (4) 387-398.

Birtanjan, R., 1999 On the glaciological, meteorological and climatological significance of Antarctic blue ice areas. *Reviews of Geophysics*, 37, 3, 337-359.

Bockheim, J.G., 1980. Properties and classification of some desert soils in coarse-textured glacial drift in the Arctic and Antarctic. *Geoderma* 24, 45-69.

Bockheim, J.G., 1990. Soil development rates in the Transantarctic Mountains. *Geoderma* 47, 59-77.

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 Dry Valleys: a regional synthesis. *Arctic, Antarctic & Alpine Research* 34, 308-317.

Bockheim, J.G., 2010. Evolution of desert pavements and vesicular layer in soil of the Transantarctic Mountains. *Geomorphology* 118 (3-4), 433-443.

Bockheim, J.G., Tarnocai, C., 1998. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma* 81, 281–293.

Bockheim, J.G., McLeod, M., 2006. Soil formation Wright Valley, Antarctica since the late Neogene. *Geoderma* 137, 109-116.

Bockheim, J.G., Campbell, I.B., McLeod, M. 2008. Use of soil chronosequences for testing the existence of high-water-level lakes

levelth 2240 glacial properties

CAPÍTULO 3

Estágio de intemperismo e taxas de formação de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental

CAPÍTULO 3

Estágio de intemperismo e taxas de formação de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental

RESUMO

SOUZA, Caroline Delpupo. Estágio de intemperismo e taxas de formação de solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental. Viçosa: UFV, 2015. Cap. 3 (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

Solos de deserto polar de regiões como as Montanhas Ellsworth são ideais para o desenvolvimento de trabalhos de cronosequência de solo já que possuem dados numéricos das características pedogenéticas em bom número; têm se desenvolvido sob condições de deserto polar desde o plioceno e o agente biológico assume papel secundário na formação do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar comparativamente os níveis de intemperismo e formação dos solos de deserto polar da porção sul das Montanhas Ellsworth. Para isso, foram utilizadas propriedades morfológicas, físicas e químicas, composição

1. Introdução

O entendimento das taxas de formação do solo em diversos locais é limitado pela pobreza de dados numéricos e pela contribuição de uma grande diversidade de fatores de formação para o desenvolvimento do solo. Nesse sentido, os solos de deserto polar de regiões como as Montanhas Ellsworth, Antártica Continental, são ideias para o desenvolvimento de trabalhos dessa natureza já que possuem dados numéricos das propriedades do solo em bom número; os solos têm se desenvolvido sob condições de deserto polar desde o Plioceno (Campbell e Claridge, 1987; Denton et al., 1992); e o agente biológico assume papel secundário na formação do solo.

Os desertos polares da Antártica estão situados em um dos mais severos ambientes da Terra, caracterizados pelas baixas temperaturas, fortes ventos e escassez de água na fase líquida. Estas condições são responsáveis pelas baixas taxas de intemperismo. A lenta remoção de detritos por gravidade, por ação fluvial ou do gelo, no entanto, têm servido para preservar esta paisagem o que possibilita estudos detalhados dos processos de alteração superficial nessas áreas (Matsuoka, 1995).

Jenny (1941, 1961) define *cronossequência de solos* como um ordenamento de solos de uma determinada área onde as diferenças nas características dos solos são impostas principalmente pelo fator *tempo*. Essa análise vem sendo frequentemente utilizada em ambientes de deglaciação da Antártica entendendo que as diferenças mais marcantes entre as características dos solos destas regiões são altamente dependentes do tempo de exposição destas superfícies condicionadas à regressão do gelo (Bockheim, 1979).

Além das propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas utilizadas para descrever o grau de desenvolvimento dos solos de regiões tropicais e subtropicais, características relativas à pedregosidade superficial e à salinidade também são utilizadas para estudos de cronossequências de solos de regiões polares (Bockheim, 1979; Bockheim, 1980; Campbell e Claridge, 1987; ☐

☐ Os ☐nde

2. Área de estudo

As Montanhas Ellsworth formam o acidentado grupo de montanhas da região central da Antártica Ocidental, tendo 350 km de extensão por 80 km de largura (Figura 1). É composta pela Cadeia Sentinel, ao norte, e Cadeia Heritage, ao sul, sendo divididas pela Geleira Minnesota, no centro (Webers et al., 1992a). Possui uma orientação NNW-SSE e se limita pelas longitudes 78° e 87°W e latitudes 80°30' e 77°15'S (Denton et al., 1992).

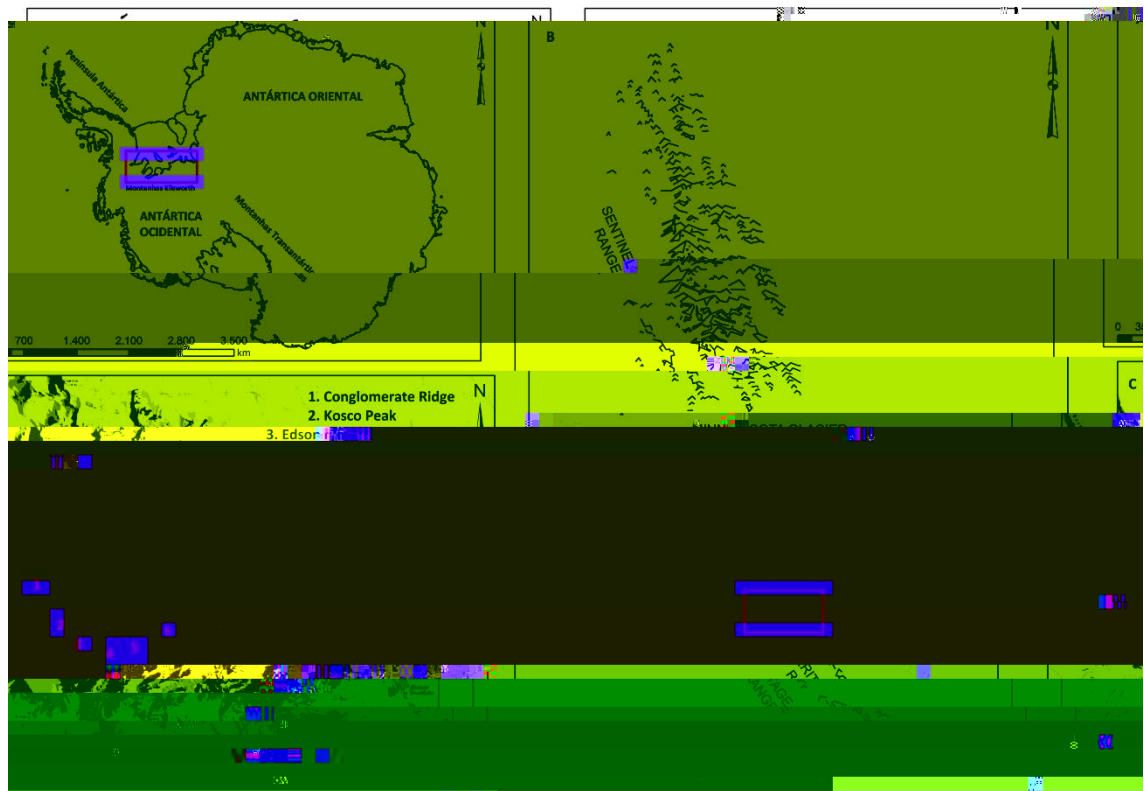


Figura 1: Montanhas Ellsworth no contexto do continente antártico (a); área da Geleira Union no contexto das Montanhas Ellsworth (b); Detalhe das áreas livres de gelo da Geleira Union (c), onde 1: Conglomerate Ridge; 2: Kosco Peak; 3: Edson Hills; 4: Elephant Head; 5: Mount Dolence; e 6: Rossman Cove.

A Cadeia Sentinel possui escarpas de 2500 m de altitude que sobem abruptamente em direção ao Platô Polar as elevações superam 5000 m no pico do maciço Vinson (5140 m), ponto mais alto da Antártica. Por outro lado, Vennum e Nishi (1992) afirmam que a topografia da Cadeia Heritage é muito mais suave e suas elevações decrescem em direção ao sul onde é composta por uma série de montes e *nunataks* dispersos.

Dados climáticos das Montanhas Ellsworth são escassos e bastante variáveis (Vennum e Nishi, 1992). Segundo dados da estação meteorológica chilena Teniente Parodi nos Montes Patriot, no sul da Cadeia Heritage, as temperaturas médias no verão giram em torno de -15 °C, embora existam relatos de temperaturas de -30 °C em outubro e -5 °C em dezembro. Já no inverno, as temperaturas médias perpassam os -40 °C (Turner e Pendlebury, 2012). Rubin e Weyant (1965) sugerem que a precipitação média da área oscila entre 150 e 175 mm por ano, em sua maioria em forma de neve.

A espessura do permafrost e camada ativa são pouco conhecidas, embora as Montanhas Ellsworth estejam inseridas na zona de permafrost contínuo (Campbell e Claridge, 1987). No estudo de Denton et al. (1992), em que foram coletados 22 perfis de solo, 41% continha permafrost seco dentro dos primeiros 70 cm; 27% tinha permafrost cimentado por gelo dentro dos primeiros 70 cm, 27% apresentava contato lítico dentro dos primeiros 70 cm e 5% continha núcleo de gelo.

3. Material e métodos

As amostras de solo foram descritas e coletadas com base nos critérios estabelecidos por *Antarctic Permafrost and Soils* (ANTPAS, 2006). Além disso, próximo a cada um dos perfis de solo, foram coletados clastos e sais superficiais dentro de um quadrante com área conhecida, nas quais também foram tomadas várias fotos para análises posteriores. As feições de crioturbação foram identificadas e classificadas de acordo com Bockheim e Tarnocai (1998). Os solos foram classificados segundo a *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2010).

Para este estudo foram selecionados solos de diferentes cotas altimétricas entendendo que o processo de expansão e retração das geleiras se dá também em gradiente altitudinal. Além disso, os solos estudados se desenvolveram em duas geoformas distintas: (i) campo de solo poligonal em fundo de vale glacial e (ii) *drift* em encosta de detritos. Informações mais detalhadas sobre a descrição e localização dos perfis de solo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição geral, localização e classificação dos perfis de solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil	Altitude (m)	Localização	Coordenadas ¹	Descrição
EL1	886	Mount Dolence	79°49'31,3" 83°11'81,1"	Solo coletado em terço médio de encosta de detritos convexa sobre quartzito cinza escuro e verde. Bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 20 cm; pavimento pedregoso de 2 cm; contato lítico a 20 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.
EL5	856	Elephant Head	79°49'28,4" 83°19'09,3"	Solo coletado em terço médio de circo glacial sobre mármore e quartzito. Bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 10/15 cm; pavimento pedregoso de 4 cm; contato lítico a 20 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.
EL15	808	Edson Hills	79°49'12,4" 83°40'16,1"	Solo coletado em fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões sobre filitos e metavulcânicas (porção montante do vale e face oposta Pico Lester). Moderadamente drenado; não vegetado; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; presença de cunha de gelo; fraco desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 5 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.
EL20	820	Edson Hills	79°49'13,3" 83°38'53,1"	Solo coletado em encosta de detritos sobre filitos e metavulcânicas (face oposta Pico Lester). Bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 35 cm; pavimento pedregoso de 3 cm; contato lítico a 50 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.
EL16	899	Rossmann Cove	79°48'02,4" 82°55'50,1"	Solo coletado em terço médio de encosta de detritos convexa sobre quartzito verde claro, próximo de neveiro. Moderadamente drenado; não vegetado; permafrost a 30 cm; pavimento pedregoso de 2 cm; contato lítico a 50 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.
EL24	729	Rossmann Cove	79°47'44,2" 82°55'49,5"	Solo coletado em porção mais deprimida de fundo de vale glacial rochoso em campo de solos com padrões sobre quartzito verde claro. Imperfeitamente drenado; presença de líquens crustosos; permafrost cimentado por gelo a 30 cm; moderado desenvolvimento de guirlandas de pedras; pavimento pedregoso de 2 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.
EL25	893	Kosco Peak	79°47'00,6" 83°44'31,7"	Solo coletado em terço médio de encosta de detritos convexa sobre conglomerado-mármore e quartzito. Bem drenado; não vegetado; permafrost seco a 40 cm; pavimento pedregoso de 3 cm. Contato lítico a 65 cm. Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.
EL28	959	Conglomerate Ridge	79°43'57,5" 83°56'10,9"	Solo coletado em plataforma medial sobre quartzito, xisto e mármore. 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). Acumulação de sal abaixo dos clastos; em crostas frequentes sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil; horizonte fracamente cimentado por sal.

¹Coordenadas Geográficas, zona 17S, datum WGS 84.

A cor do solo seco foi determinada utilizando caderneta de Munsell (1994). A proporção de material grosso ($> 2 \text{ mm } \emptyset$) foi determinada gravimetricamente pela diferença de peso entre a amostra total e a terra fina seca ao ar (TFSA), em laboratório. A textura foi determinada conforme Embrapa (2011), porém, com agitação lenta conforme indicações de Ruiz (2005). A temperatura dos diferentes horizontes do solo foi medida em campo com termômetro digital tipo espeto.

O pH em água e os teores de cátions trocáveis foram determinados conforme procedimentos indicados pela Embrapa (2011). Fósforo, sódio e potássio disponíveis foram extraídos com Mehlich - 1 ($\text{HCl } 0,5 \text{ mol/L} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025 \text{ mol/L}$) utilizado a proporção de 1:10 (solo:solução), sendo o fósforo determinado por espectrometria de absorção molecular UV/Visível e o sódio e potássio por fotometria de emissão de chama. A dosagem de cálcio e magnésio foi realizada por espectroscopia de absorção atômica e alumínio trocável por titulometria após a extração com $\text{KCl } 1 \text{ mol/L}$ na relação 1:10 (solo:solução). A acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) foi determinada por titulometria após extração com $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \text{ } 0,5 \text{ mol/L}$ na relação 1:10 (solo:solução) a pH 7,0 (Embrapa, 2011). A condutividade elétrica foi determinada no extrato aquoso na relação 1:5 (Richards, 1954) e posteriormente corrigida em função da granulometria do solo, segundo indicações de Slavich e Petterson (1993). Os teores de ferro de minerais pedogenéticos foram extraídos com ditionito-citrato ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{dc}$) (McKeague e Day, 1966). A determinação foi feita por espectroscopia de absorção atômica.

Amostras em pó da fração argila de alguns horizontes de interesse foram submetidas à análise de difração de raios X para identificação dos minerais presentes, na linha de difração de raios X em pó (XPD) do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Os minerais foram identificados a partir de seus picos característicos com auxílio do banco de dados disponível no programa *Match! 2*[®], por tabelas propostas por Chen (1977) e por meio de informações disponíveis no banco de dados de minerais do site *webmineral*[®].

A pedregosidade superficial foi caracterizada a partir da descrição da distribuição por classes de tamanho dos clastos (cascalho, calhau e matacão), arredondamento/arestamento, polimento de sua superfície, oxidação, intemperismo cavernoso e presença de ventifactos dentro de um quadrante de 50 cm de lado na superfície de cada um dos perfis de solo analisados. Os procedimentos para medições e descrições foram realizados segundo indicações de Campbell e Claridge (1975) e Campbell e Claridge (1987).

A salinidade foi caracterizada morfogenética e quimicamente. A caracterização morfogenética de sais baseou-se em critérios estabelecidos por Bockheim (1990), que incluem a forma e intensidade da acumulação de sal na superfície do solo e dentro do perfil. As descrições foram feitas dentro de um quadrante de 50 cm de lado na superfície de cada um dos perfis de solo analisados. A caracterização química dos sais solúveis foi realizada a partir da determinação de ânions e cátions no extrato da remoção de sais solúveis utilizando álcool hidratado (1:5), segundo indicações de Richards (1954). Os ânions cloreto, nitrato e sulfato foram determinados por cromatografia iônica. Os cátions foram determinados em fotômetro de chama (sódio e potássio) e espectrômetro de absorção atômica (cálcio e magnésio).

O estágio de intemperismo dos solos analisados foi determinado segundo indicações de Campbell e Claridge (1975) e Campbell e Claridge (1987), por meio do estudo da pedregosidade superficial, morfologia dos solos, padrões de superfície, forma do permafrost, teor de argila, minerais presentes, salinidade etc.

4. Resultados

Para solos desenvolvidos no contexto climático de deserto polar e sobre rochas metamórficas, os teores de partículas finas representam evidência bastante fidedigna do grau de intemperismo. Dessa forma, o perfil EL28 apresentou maiores valores

médios de fração fina (silte + argila) ao longo do perfil. O perfil EL24 demonstrou concentrar fração fina, notadamente a fração silte na base do perfil evidenciando a translocação desta fração como resultado de crioturbação. As menores proporções de fragmentos de rocha maiores de 2 mm reforçam a ideia de maior fragmentação mecânica. Assim, também o perfil EL28 apresentou menor proporção de material grosso (Tabela 2).

O desenvolvimento da cor é um importante parâmetro que indica diferentes estágios de intemperismo do solo (Campbell e Claridge, 1987). Dos solos analisados, o perfil que apresentou maiores valores de cromas foi o perfil EL5, coletado em Elephant Head, apresentando horizonte superficial rosado (5YR 8/3). O perfil EL25, coletado em Kosco Peak, apresentou cor bruno-amarelado-claro (5Y 6/3) em seu horizonte superficial. O perfil EL24, do campo de solos poligonais de Rossman Cove, e o perfil EL25, do fundo do vale glacial Edson Hills, apresentaram cor amarelo-claro-acinzentada (5Y 8/2 e 5Y 6/3, respectivamente). O restante dos solos apresentou cores sem sinais de oxidação (Tabela 2).

Nos perfis EL5, EL24 e EL25, o desenvolvimento da cor é reflexo da oxidação dos horizontes superficiais, fato que está relacionado a um nível intermediário de intemperismo. EL15 e EL20 apresentam maiores valores de croma ao longo de todo o perfil, indicando grau de intemperismo acima do restante, onde a oxidação se restringiu à superfície. Por fim, em EL24, o desenvolvimento de cor acompanha o aumento de teor de silte em subsuperfície, o que não indica maior intemperismo, mas o resultado da acumulação desta fração em profundidade (Campbell e Claridge, 1987).

Tabela 2. Propriedades morfológicas e físicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade cm	Temperatura °C	Cor do solo seco	Estrutura ¹	Transição	Fração grossa ^{2,6} dag/kg	Areia ^{3,7}	Silte ^{4,7}	Argila ^{5,7}	Classificação textural ⁸
EL1 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel										
Cnz	0-6	6,1	5Y 8/2 Amarelo-claro-acinzentado	fr m bla	Gradual e ondulada	90	83	11	6	Areia-franca
Cnff1	6-12	-4,5	5Y 8/1 Branco	gs	Gradual e ondulada	40	85	12	3	Areia-franca
Cnff2	12-20	-5,6	5Y 8/1 Branco	gs	Gradual e ondulada	30	86	11	3	Areia-franca
EL5 Elephant Head - Lithic Anhyorthel										
Cox	0-5	1,8	5YR 8/3 Rosado	mc	Clara e ondulada	95	72	26	2	Franco-arenosa
Coxff	5-10	-0,5	2,5YR 8/2 Branco-rosado	gs	Clara e ondulada	65	71	27	2	Franco-arenosa
Coxff	10-15	-2,8	2,5YR 8/2 Branco-rosado	gs	Clara e ondulada	65	84	15	1	Areia-franca
EL15 - Edson Hills- Typic Haploturbel										
Coxfz1	0-5	2,9	5Y 7/3 Amarelo-claro-acinzentado	fr m bla	Clara e irregular	54	71	27	2	Franco-arenosa
Coxfz2	5-20	0,4	5Y 6/3 Oliva-claro-acinzentado	mc	Clara e ondulada	47	63	34	2	Franco-arenosa
EL20 - Edson Hills - Lithic Anhyorthel										
Cox1	0-10	3,3	5Y 7/3 Amarelo-claro-acinzentado	mc	Clara e ondulada	52	72	25	3	Franco-arenosa
Cox2	10-20	2,0	5Y 7/2 Cinzento-claro	gs	Clara e ondulada	51	56	41	3	Franco-arenosa
EL16 - Rossman Cove - Typic Haploturbel										
Cnf	0-15	11,0	5Y 7/1 Cinzento-claro	mc	Clara e ondulada	61	89	7	4	Areia
Cnfff	15-30	-0,5	5Y 8/1 Branco	gs	Clara e ondulada	64	84	15	1	Areia-franca
EL24 - Rossman Cove - Typic Haploturbel										
Cnj1	0-10	4,8	5Y 8/1 Branco	mc	Clara e plana	63	80	15	5	Areia-franca
Cnj2	10-25	2,9	5Y 8/1 Branco	mc	Clara e plana	57	83	13	4	Areia-franca
Cnfj	25-30	0,3	5Y 8/2 Amarelo-claro-acinzentado	mc	Clara e plana	45	53	44	3	Franco-arenosa
EL25 - Kosco Peak - Calcic Anhyorthel										
Coxz	0-25	7,5	5Y 6/3 Bruno-amarelado-claro	gs	Clara e ondulada	58	76	23	1	Areia-franca
Coxffkz	25-60 ⁺	-0,4	5Y 7/2 Cinzento-claro	gs	Clara e ondulada	48	68	31	1	Franco-arenosa
EL28 - Conglomerate Ridge - Sodic Anhyorthel										
Cnmn	0-5	10,3	5Y 7/2 Cinzento-claro	fr m bla	Clara e ondulada	45	66	32	2	Franco-arenosa
Cn	5-25	4,3	5Y 8/1 Branco	fr m bla	Clara e ondulada	44	64	35	1	Franco-arenosa

¹Desenvolvimento: fr = fraca, mo = moderada; Tamanho: m = média, g=grande; Tipo: mc = maciça, gs = grãos simples, bla = blocos angulares. ²Fração grossa: >2,0 mm Ø. ³Areia: 2,0 mm-0,05 mm Ø. ⁴Silte: 0,05-0,002 mm Ø. ⁵Argila: <0,002 mm Ø. ⁶Porcentagem determinada na amostra integral de solo. ⁷Porcentagem em relação à fração TFSA (>2 mm Ø); nd = não determinado. ⁸Relativa à fração menor que 2 mm.

Os perfis EL15 e EL28 foram os únicos que apresentaram desenvolvimento de estrutura nos horizontes superficiais. Destes, o perfil EL28 apresentou estrutura também em subsuperfície, sugerindo a atuação de agentes cimentantes. Todo o restante dos solos analisados apresentou suas partículas organizadas em forma maciça ou grãos simples (Tabela 2).

O solos analisados são predominantemente alcalinos, com pH variando de 6,44 a 9,09 (Tabela 3), indicando o baixo grau evolutivo. Nem mesmo os perfis EL15 e EL20 - solos desenvolvidos sob influência de material vulcânico contendo sulfetos - mostraram grandes evidências da ocorrência de processos intempéricos mais avançados considerando o pH como indicador (Tabela 3).

O complexo de trocas dos solos de Ellsworth é composto principalmente por cálcio, seguido por magnésio, sódio e potássio. Essa situação é bastante típica em outros solos de deserto polar, demonstrando a natureza menos móvel de cátions bivalentes que monovalentes. Todos os solos são eutróficos coerentemente com as limitadas condições de lixiviação. De uma forma geral, a CTC dos solos é relativamente baixa devido à pequena proporção de argila e matéria orgânica. No entanto, no conjunto dos solos amostrados, os perfis EL24, EL25 e EL26 apresentam valores um pouco maiores (Tabela 3).

Os teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{dc}$ apresentam visível incremento nos perfis EL15 e EL20 (Tabela 3). No entanto, esse comportamento não pode ser atribuído unicamente a um maior tempo de exposição da superfície onde o solo se encontra, mas também a grande influência do material de origem sulfetado e o desencadeamento de oxidação, mesmo que de forma incipiente. Desconsiderando a possível influência do material de origem sulfetado, os solos que apresentaram maiores teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{dc}$ foram os perfis EL24 e EL25, indicando aumento, mesmo que incipiente de produtos do intemperismo de minerais primários.

Tabela 3. Propriedades químicas dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Horizonte	Profundidade (cm)	pH ¹	P ²	K ²	Na ²	Ca ³	Mg ³	Al ³	H+Al ⁴	SB ⁵	t ⁶	T ⁷	V ⁸	ISNa ⁹	CE ¹⁰	Fe ₂ O ₃ dc ¹¹
			mg/dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	%	dS/m ³
EL1 Mount Dolence - Lithic Anhyorthel																
Cnz	0-6	8,18	273,0	0,47	0,21	1,24	0,21	0,00	0,5	2,13	2,13	2,63	81,0	10,08	4,0	0,06
Cnff1	6-12	8,59	209,6	0,30	0,07	1,05	0,21	0,00	0,5	1,65	1,65	2,15	76,7	4,82	1,2	0,06
Cnff2	12-20	8,70	268,9	0,25	0,08	1,03	0,20	0,00	0,3	1,57	1,57	1,87	84,0	5,34	1,0	0,06
EL5 Elephant Head - Lithic Anhyorthel																
Cox	0-5	9,01	0,4	0,01	0,07	1,33	0,09	0,00	0,3	1,51	1,51	1,81	83,4	5,27	0,7	0,09
Coxff	5-10	8,98	0,3	0,01	0,07	1,37	0,12	0,00	0,2	1,58	1,58	1,78	88,8	5,04	0,8	0,07
Coxff	10-15	8,82	0,3	0,01	0,07	1,36	0,13	0,00	0,3	1,58	1,58	1,88	84,0	5,04	2,0	0,07
EL15 - Edson Hills- Typic Haploturbel																
Coxfz1	0-5	7,52	59,2	0,07	0,13	4,71	0,38	0,00	0,5	5,29	5,29	5,79	91,4	2,51	6,7	1,32
Coxfz2	5-20	8,39	95,6	0,06	0,41	2,94	1,44	0,00	0,3	4,86	4,86	5,16	94,2	8,45	4,8	1,32
EL20 - Edson Hills - Lithic Anhyorthel																
Cox1	0-10	8,19	76,0	0,06	0,13	2,24	0,20	0,00	0,6	2,64	2,64	3,24	81,5	5,04	1,75	1,07
Cox2	10-20	8,16	311,7	0,06	0,27	2,57	0,32	0,00	0,6	3,24	3,24	3,84	84,4	8,52	2,92	0,75
EL16 - Rossman Cove - Typic Haploturbel																
Cnf	0-5	8,51	127,9	0,14	0,09	1,43	0,13	0,00	0,5	1,80	1,80	2,30	78,3	5,0	1,1	0,04
Cnff	5-30	6,44	337,5	0,11	0,05	1,20	0,11	0,00	0,6	1,48	1,48	2,08	71,2	4,0	1,0	0,04
EL24 - Rossman Cove - Typic Haploturbel																
Cnjj1	0-10	8,71	322,7	0,40	0,18	1,26	0,14	0,00	0,8	1,99	1,99	2,79	71,3	9,31	3,03	0,06
Cnjj2	10-25	8,58	219,0	0,19	0,05	0,92	0,13	0,00	1,0	1,29	1,29	2,29	56,3	3,94	1,03	0,06
Cnfjj	25-30	8,89	277,3	0,12	0,06	1,05	0,08	0,00	1,0	1,32	1,32	2,32	56,9	5,17	0,67	0,11
EL25 - Kosco Peak - Calcic Anhyorthel																
Coxz	0-25	6,77	23,9	0,03	0,34	2,24	0,72	0,00	0,2	3,36	3,36	3,56	94,4	10,14	4,87	0,30
Coxffkz	25-60	8,59	29,4	0,03	0,72	7,61	1,54	0,00	0,3	9,90	9,90	10,20	97,1	7,29	14,72	0,45
EL28 - Conglomerate Ridge - Sodic Anhyorthel																
Cnmn	0-5	8,96	26,3	0,15	0,46	1,91	0,30	0,00	0,6	2,84	2,84	3,44	82,6	16,43	2,50	0,34
Cn	5-10	8,70	24,2	0,08	0,25	1,80	0,36	0,00	0,3	2,49	2,49	2,79	89,2	10,04	3,08	0,27

¹Em água; ²Extraído com Mehlich 1; ³Extraído com KCl 1 mol.L⁻¹; ⁴Extraído com Acetato de Cálcio 0,5 mol.L⁻¹ à pH 7,0; ⁵Soma de bases trocáveis; ⁶Capacidade de troca catiônica efetiva; ⁷Capacidade de troca catiônica à pH 7,0; ⁸Saturação por bases; ⁹Índice de saturação por sódio; ¹⁰Condutividade elétrica; ¹¹Teor extraído com ditionito-citrato.

A assembleia mineralógica revelou pequena formação de minerais secundários pedogenéticos. A fração argila é composta principalmente por muitos minerais primários como quartzo, calcita, feldspato-K e clorita. Além disso, minerais secundários como illita e haloisita hidratada apareceram em alguns dos solos analisados. Todos os solos apresentam o mineral halita, reflexo da limitada lixiviação a qual estes solos estão expostos (Tabela 4).

Tabela 4. Mineralogia da argila dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil - Local	Minerais de argila
EL1 - Mount Dolence	Ilita, quartzo, feldspato potássico, halita
EL5 - Elephant Head	Ilita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita
EL15 - Edson Hills	Ilita, clorita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita
EL20 - Edson Hills	Ilita, clorita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita
EL16 - Rossman Cove	Ilita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita
EL24 - Rossman Cove	Ilita, quartzo, feldspato potássico, halita
EL25 - Kosco Peak	Ilita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita
EL28 - Conglomerate Ridge	Ilita, clorita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico, halita

Alguns solos apresentaram maior diversificação mineralógica que pode ser indicativo do maior nível de alteração do substrato. Os perfis EL15, EL20 e EL28 apresentam na fração argila de seus horizontes superficiais os minerais illita, clorita, haloisita hidratada, quartzo, feldspato potássico e halita (Tabela 4). É possível que tanto a clorita quando a illita possam ser de origem poligênica, ou seja, supergênica e pedogenética. As illitas e cloritas supergênicas na fração argila de solos são fruto da fragmentação física dos minerais micáceos do material de origem. Esse comportamento também foi reportado por Vennum e Nejedly (1990) em solos pouco desenvolvidos da Antártica Ocidental.

A illita proveniente de neoformação ocorre a partir de soluções ricas em sílica e potássio, situação condizente com os solos desta sequência já que possuem o mineral fengita no material de origem e na fração areia (Thompson e Ukrainczyk, 2002). A neoformação de clorita em solos não é muito comum e restringe-se a solos muito jovens (Kämpf et al., 2009). Considerando as condições climáticas atuais experimentadas por Ellsworth, é coerente assumir que a maior parte das micas que compõem a fração argila destes solos está relacionada ao primeiro caso, assim como em outros solos de deserto polar da Antártica (Bockheim, 1997).

A análise da pedregosidade superficial dos perfis analisados demonstrou que todos os perfis apresentam pavimento pedregoso (Tabela 5). Os perfis EL1, EL5, EL16 e EL25 apresentam mais de 90 % da superfície do solo coberta por fragmentos de rochas maiores que areia (Tabela 5). O restante dos perfis varia entre 80 e 90 % da superfície coberta por fragmentos grossos. De forma geral, os clastos acumulados na superfície do solo enquadram-se na classe de tamanho de calhaus (2-20 cm), seguidos por matacões (> 20 cm) e cascalhos (2 mm-2 cm). Os perfis desenvolvidos em Mount Dolence e Elephant Head (EL1 e EL5) apresentam as menores taxas de redução de tamanhos dos clastos superficiais, com 25 e 32 % de matacões, respectivamente. Por outro lado, os perfis EL15, EL20 e EL28 foram os que apresentaram maiores taxas de redução de fragmentos grossos, com 22, 20 e 25 % de sua superfície coberta por cascalhos, respectivamente.

De uma forma geral o intemperismo cavernoso foi muito incipiente assim como a formação de ventifactos, indicando a natureza recente de toda a superfície dos solos de Ellsworth. Os clastos superficiais são bastante arestados, sugerindo limitado transporte dos fragmentos produzidos pela crioclastia. A oxidação dos solos é altamente dependente do material de origem. Dessa forma, a superfície dos solos desenvolvidos sobre mármore (EL5) e sobre argilitos (EL15 e EL20) apresentam grande frequência de clastos oxidados. Por outro lado, a superfície do perfil EL28 revelou oxidação acima do esperado (40 %) considerando sua litologia variada (Tabela 5).

Tabela 5. Características da pedregosidade superficial dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil/Local	Área ocupada fragmentos > 2,0 mm (%)	Frequência de Tamanho (%)			Intemperismo cavernoso	Ventifactos	Oxidação (%)	Arestamento	Arredondamento
		Cascalho	Calhau	Matacão					
EL1 - Mount Dolence	98	8	67	25	Fraco	Fraco	30	Forte	Fraco
EL5 - Elephant Head	99	5	63	32	Fraco-médio	Fraco	65	Médio	Médio
EL15 - Edson Hills	82	22	69	9	Inexistente	Inexistente	60	Forte	Fraco
EL20 - Edson Hills	85	20	74	6	Inexistente	Fraco	25	Forte	Fraco
EL16 - Rossman Cove	95	10	82	8	Inexistente	Fraco	10	Forte	Fraco
EL24 - Rossman Cove	86	10	75	15	Fraco	Fraco	5	Forte	Fraco
EL25 - Kosco Peak	90	9	90	1	Fraco	Fraco	15	Médio	Médio
EL28 - Conglomerate Ridge	80	25	65	10	Fraco	Fraco	40	Médio	Médio

Todos os solos analisados acumulam sal em maior ou menor grau. O perfil EL1 foi o que apresentou menor acumulação, 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, assim como os índices de saturação por sódio (ISNa). Da mesma forma, excetuando o seu horizonte superficial, os teores de cátions e ânions solúveis foram todos abaixo da média dos outros perfis (Tabela 6).

Os perfis EL5, EL20 e EL16 enquadraram-se no estágio de sal 3, apresentando indício de mediana acumulação de sal como crostas salinas comuns na superfície do solos, 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. Os teores de cátions e ânions desses solos se aproximaram mais da média geral dos solos de Ellsworth ou ligeiramente ultrapassando a média (Tabela 6).

Os perfis EL15 e EL25 formam o terceiro grupo de solos que se enquadraram 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 (Soil Survey Staff, 2010). Também o ISNa foi superior nesses solos, não suficientes para caracterizarem horizontes sódico (Soil Survey Staff, 2010).

O perfil EL28 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. Corroborando tal situação, os teores de cátions e ânions foram bastante elevados, sendo a maioria acima da média dos outros perfis (Tabela 3).

Tabela 6. Estágio morfogênético e composição química dos sais solúveis dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil/ Horizonte Prof. (cm)	Local	Sais Solúveis ¹							Morfologia de acumulação do Sal	Estágio de Sal ²
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻		
		mg/L								
EL1 Cnz	Mount Dolence	95,7	239,17	35,9	4,0	118,58	28,48	65,55	Abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	2
EL1 Cnff1	Mount Dolence	28,4	64,28	34,2	3,5	5,82	33,75	54,35		
EL1 Cnff2	Mount Dolence	7,5	32,85	36,0	2,9	4,06	30,57	51,16		
EL5 AC1 0-5	Elephant Head	0,0	32,89	65,7	3,5	25,30	41,36	70,55	Abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL5 C2 5-10	Elephant Head	0,0	25,44	65,9	3,7	13,59	40,42	78,99		
EL5 C3 10-15	Elephant Head	0,0	28,39	71,0	4,5	10,17	50,31	98,46		
EL15 C1 0-5	Edson Hills	0,0	44,85	63,4	4,4	12,64	35,74	128,38	Abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL15 C2 5-20	Edson Hills	0,0	148,50	40,1	13,8	56,46	52,68	224,76		
EL20 C1 0-10	Edson Hills	0,0	29,98	72,0	2,5	10,22	38,37	120,14	Abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo.	3
EL20 C2 10-20	Edson Hills	0,0	86,78	56,0	3,9	17,90	40,08	82,46		
EL16 C1 0-5	Rossman Cove	0,0	40,40	54,7	2,1	12,79	49,41	71,49	Abaixo dos clastos; em crostas raras sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL16 C2 5-30	Rossman Cove	7,5	358,57	50,8	1,9	9,95	47,58	74,43		
EL24 C1 0-10	Rossman Cove	nd	58,44	37,8	2,1	55,98	103,15	130,13	Abaixo dos clastos; em crostas raras sobre rochas; raras na superfície do solo.	3
EL24 C2 10-25	Rossman Cove	23,9	28,37	41,7	0,7	29,60	61,14	57,54		
EL24 C3 25-30	Rossman Cove	0,0	22,48	59,9	2,1	16,42	40,38	60,28		
EL25 C1 0-25	Kosco Peak	0,0	68,97	79,8	11,3	95,39	80,37	85,73	Abaixo dos clastos; em crostas comuns sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil.	4
EL28 C1 0-5	Conglomerate Ridge	52,3	89,71	58,8	4,7	19,57	57,22	151,04	Abaixo dos clastos; em crostas frequentes sobre rochas; comuns na superfície do solo; sais dispersos no perfil; horizonte fracamente cimentado por sal.	5
EL28 C2 5-10	Conglomerate Ridge	82,4	115,42	51,5	4,2	19,49	32,33	129,84		
	Número de amostras	17	18	18	18	18	18	18		
	Teor mínimo	0,00	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	96,40		
	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; ²Classificação segundo Bockheim (1990).

Todos os solos analisados apresentaram permafrost dentro dos primeiros 100 cm ou material gélido dentro desta mesma profundidade e permafrost até 200 cm, sendo, portanto, enquadrados na ordem dos Gelisols pela Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010). Corroborando a classificação de solos de deserto polar de outras regiões da Antártica, os solos de Ellsworth foram enquadrados em dois principais grandes grupos: *Haploturbel* e *Anhyorthel* (Tabela 7). Os solos classificados como *Haploturbel* estão localizados em fundos de vale e apresentam permafrost cimentados por gelo próximos à superfície. Em nível de subgrupo, todos os *Haploturbels* foram enquadrados como *Typic*.

Tabela 7. Classificação pedogenética e Estágio de intemperismo dos solos da porção sul das Montanhas Ellsworth, Antártica Continental.

Perfil - Local	Classificação Soil Taxonomy ¹	Estágio de intemperismo ²
EL1 - Mount Dolence	Lithic Anhyorthel	2
EL5 - Elephant Head	Lithic Anhyorthel	2
EL15 - Edson Hills	Typic Haploturbel	3
EL20 - Edson Hills	Lithic Anhyorthel	2
EL16 - Rossman Cove	Typic Haploturbel	2
EL24 - Rossman Cove	Typic Haploturbel	2
EL25 - Kosco Peak	Calcic Anhyorthel	3
EL28 - Conglomerate Ridge	Sodic Anhyorthel	3,5

¹Classificação segundo a Soil Survey Staff (2010); ²Classificação segundo Campbell e Claridge (1987).

Os solos enquadrados nos grande grupo *Anhyorthel* apresentam permafrost seco relacionado às condições de extrema aridez experimentada por Ellsworth (Tabela 7). Esses solos possuem o que a Soil Survey Staff (2010) denomina de condição *Anhydrous*, onde o ambiente extremamente árido forma o permafrost seco, um tipo muito especial de permafrost com conteúdos de umidade muito baixas provenientes da sublimação do gelo subsuperficial (Bockheim, 1997; Bockheim & Schaefer, 2015). Os perfis EL1, EL5 e EL20 foram classificados como *Lithic Anhyorthel* em nível de subgrupo, devido à presença de contato lítico dentro dos primeiros 100 cm. Já os perfis EL25 e EL28 apresentaram grande acumulação de sal e por isso foram classificados como *Calcic Anhyorthel* e *Sodic Anhyorthel* em nível de subordem (Soil Survey Staff, 2010).

Os resultados apresentados permitem agrupar os solos em três diferentes estágios de intemperismo (Campbell e Claridge, 1987) (Tabela 7).

Os perfis EL1, EL5, EL20, EL16 e EL24 apresentaram características típicas de solos com limitado grau de transformação do substrato e foram classificados no estágio 2 de intemperismo. Já os perfis EL15 e EL25 apresentaram algumas evidências de maior desenvolvimento pedogenético e enquadraram-se no estágio 3 de intemperismo. Por fim, o perfil EL28 foi enquadrado no estágio de intemperismo 3,5, apresentando características compatíveis com maior desenvolvimento pedogenético.

5. Discussão

Os parâmetros utilizados para avaliar o grau de alteração do substrato e desenvolvimento pedogenético dos solos desenvolvidos na porção sul das Montanhas Ellsworth mostraram-se bastante sensíveis e revelaram três grandes grupos de solos com idades diferentes.

Os perfis desenvolvidos em Mount Dolence (EL1), Elephant Head (EL5), Rossman Cove (EL16 e EL24) e na encosta do vale glacial Edson Hills (EL20) foram os solos menos intemperizados (estágio 2 de intemperismo). Eles mostraram-se fracamente desenvolvidos, mesmo para os padrões da Antártica, embora apresentassem alguma evidência de formação de horizontes. Os clastos superficiais apresentaram pouca oxidação, baixo ou nenhum grau de arestamento e são bastante grossos (matacões e calhaus), demonstrando o pequeno nível de alteração química (oxidação) e física do substrato original.

Os principais indícios de desenvolvimento morfológico apresentados são um pequeno aumento da intensidade da cor nos horizontes superficiais, um ligeiro aumento da espessura do perfil e ocorrência de algum sal, geralmente como crostas salinas sobre rochas, abaixo de clastos e raras acumulações na superfície do solo (estágio de sal 2 e 3). Tais características foram frequentemente relacionadas como solos no estágio 2 de intemperismo desenvolvidos no vale Wright (Bockheim, 1979; Bockheim e McLeod, 2006; Bockheim e McLeod, 2008; McLeod et al., 2009), no vale Taylor (Bockheim, 2007; Bockheim et al., 2008a), na região da Geleira Beardmore (Bockheim et al., 1990) e na região do vale McMurdo (Bockheim, 2002; Bockheim et

al., 2008b) todos na chamadas área dos vales secos (Dry Valleys) entre as Montanhas Transantárticas.

Assim como Bockheim et al. (2008b) e McLeod et al., (2009) identificaram nos vales Taylor e Wright, na região dos vales secos (*Dry Valleys*) entre as Montanhas Transantárticas, os solos classificados como estágio 2 de intemperismo em Ellsworth são encontrados principalmente em altitudes mais baixas como os perfis EL24 (729 m) e EL20 (820 m) e em *drift* em encosta de detritos como os perfis EL1 (886 m) e EL5 (856 m).

Os solos desenvolvidos no fundo do vale glacial Edson Hills (EL15) e em Kosco Peak (EL25) representam os solos em estágio intermediário de intemperismo e desenvolvimento pedogenético em Ellsworth (estágio de intemperismo 3). O pavimento pedregoso desses solos é formado por clastos de classes de tamanho menores (cascalho e calhau), mais frequentemente arredondados e menos arestados e com alguma formação de intemperismo cavernoso e ventifactos. Embora não possuam grande distinção entre horizontes, os solos em estágio 3 de intemperismo demonstraram maior incremento de partículas finas (silte + argila) ao longo do perfil.

No entanto, as características mais marcantes do maior tempo de exposição destas superfícies revelaram-se na maior oxidação e maior acumulação de sal. Tanto nos clastos superficiais, quando ao longo do perfil, os solos EL15 e EL25 apresentaram maior desenvolvimento de cores com cromas maiores, demonstrando maior oxidação de ferro presente nos minerais primários e formação de fases menos cristalinas. Além disso, a acumulação de sal foi mais frequente, aparecendo além das crostas salinas sobre rochas e abaixo delas, também na superfície do solo e dispersos no perfil (estágio de sal 4). Apesar de apresentar condutividade elétrica ligeiramente maior do que os demais perfis enquadrados no estágio de sal 3, o perfil EL15 não apresentou valor suficiente para ter o caráter salic (Soil Survey Staff, 2010). Por outro lado, o perfil EL25 apresentou o caráter *calcic*, sendo classificados como *Calcic Anhyorthel* (Soil Survey Staff, 2010). Também essas características foram bastante compatíveis com solos classificados no estágio 3 de outras regiões de deserto polar na Antártica (Bockheim, 1980; Bockheim et al., 2008a; Bockheim, 2002).

Apesar do perfil EL15 estar localizado em uma cota altimétrica não muito elevada (808 m), ele apresentou características compatíveis com solos com maior

tempo de exposição. Já o perfil EL25 se localiza a 893 m de altitude, indicando ser uma superfície mais antiga do que o restante dos solos com menor estágio de intemperismo.

O perfil EL28 coletado em Conglomerate Ridge apresentou um conjunto de características que indicou o maior grau de desenvolvimento pedológico entre os solos analisados. Muitas dessas características foram compatíveis com o estágio 3 de intemperismo, notadamente o grau de alteração dos clastos superficiais (redução de tamanho e oxidação), produção de fração fina (silte + argila) e formação de minerais autigênicos na fração argila. A esse respeito, Bockheim (1980) afirma que ilitas secundárias são frequentemente mencionadas em solos de deserto polar, pois este mineral se forma em solos de pH elevado e limitada lixiviação, condição experimentada pelos solos de Ellsworth.

No entanto, no que diz respeito à acumulação de sal, o perfil EL28 apresentou visível superioridade na forma e conteúdo de acumulações de sais, sendo por isso, enquadrado no estágio de intemperismo 3,5. Além de acumular sal nas formas anteriormente citadas nos outros solos, este solo apresentou manchas mais frequentes de sal ao longo do perfil e uma leve cimentação por sódio no seu horizonte superficial, apresentando estágio de sal 5. Acumulações estas que foram fundamentais para o desenvolvimento de estrutura em blocos (mesmo que fraca) nos dois horizontes. Além disso, por conta da grande acumulação de sódio no horizonte superficial, este solo caracterizou-se pela presença do caráter *sodic*, sendo classificado como *Sodic Anhyorthel* (Soil Survey Staff, 2010).

O estágio de intemperismo 3,5 de fato não existe, mas foi adaptada para melhor classificar os EL28. Tal denominação se explica pela abundância de características típicas concernentes ao estágio 3 de intemperismo presentes neste solo, porém, com algumas propriedades condizentes com o estágio 4, notadamente àquelas relacionadas à salinidade. Localmente, Campbell e Claridge (1987) indicam subdivisões como esta para alguns indícios de maior nível de intemperismo. Por outro lado, tais subdivisões não são indicadas regionalmente, por conta de possíveis grandes diferenças do controle glacial local, material de origem e clima (Campbell e Claridge, 1987).

Corroborando a ideia de que a idade do solo acompanha o aumento da altitude, o EL28 foi o solo coletado na cota altimétrica mais elevada de Ellsworth, em 959 m. Suas características de alteração do substrato e grande acumulação de sal em superfície e em subsuperfície reforçam a hipótese que esta superfície foi exposta pelo recuo da geleira local há mais tempo que o restante dos solos.

6. Conclusões

A cronossequência de solos revelou que os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth se enquadram nos estágios 2, 3 e 3,5 de intemperismo, condizente com a região climática na qual Ellsworth se encontra. Os solos mais desenvolvidos de Ellsworth estão localizados em cotas altimétricas mais elevadas por se tratarem de superfícies mais antigas que estão expostas há mais tempo pela retração da geleira local.

Solos dos estágios 2 e 3 de intemperismo mostraram pequena redução de tamanho e oxidação dos clastos componentes do pavimento pedregoso. Além disso, apresentaram menor acúmulo de sal em superfície e raras acumulações em subsuperfície. Por outro lado, o solo classificado no estágio de intemperismo 3,5 indicou maior grau de alteração do substrato, maior desenvolvimento de cores cromadas e maior acumulação de sal, que apresentou mobilidade para porções mais subsuperficiais do perfil.

Quando comparados com solos desenvolvidos em outras regiões da Antártica, os solos de Ellsworth apresentam limitada evolução pedogenética, pois experimentam um contexto climático de frio extremo e umidade restrita. No entanto, mesmo atuando em taxas mais lentas, seus solos apresentam processos de intemperismo e pedogênese típicos de outras áreas periglaciais da Antártica, como a crioturbação, salinização e oxidação de sulfetos.

Referências Bibliográficas

- Antarctic Permafrost and Soils - ANTPAS, 2006. Soil description manual - guide for describing, sampling, analyzing, and classifying soils of the Antarctic region. <http://erth.waikato.ac.nz/antpas> (accessed 19 Dec 2012).
- Beyer, L., Bockheim, J.G., Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., 1999. Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols. *Antarctic Science* 11 (4) 387-398.
- Bockheim, J.G., 1979. Relative age and origin of soils in eastern Wright Valley, Antarctica. *Soil Sci. Am. J.* 128, 142–152.
- Bockheim, J.G., 1980. Properties and classification of some desert soils in coarse-textured glacial drift in the Arctic and Antarctic. *Geoderma* 24, 45-69.
- Bockheim, J.G., 1990. Soil development rates in the Transantarctic Mountains. *Geoderma* 47, 59-77.
- 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 Dry Valleys: a regional synthesis. *Arctic, Antarctic & Alpine Research* 34, 308-317.
- Bockheim, J.G., 2007. Soil processes and development rates in the Quartermain Mountains, upper Taylor Glacier region, Antarctica. *Geogr. Ann.* 89A, 153–165.
- Bockheim, J.G., Ackert Jr., R.P., 2007. Implications of soil on mid-Miocene-aged drifts in the McMurdo Dry Valleys for ice sheet history and paleoclimate reconstruction. *Geomorphology* 92, 12-24.
- Bockheim, J.G., Campbell, I.B., McLeod, M., 2008b. Use of soil chronosequences for testing the existence of high-water-level lakes in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Catena* 74, 144-152.
- Bockheim, J.G., McLeod, M., 2006. Soil formation Wright Valley, Antarctica since the late Neogene. *Geoderma* 137, 109-116.
- Bockheim, J.G., McLeod, M., 2008. Soil distribution in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Geoderma* 144, 43–49.
- Bockheim, J.G., Prentice, M.L., McLeod, M., 2008a. Distribution of glacial deposits, soils and permafrost in Taylor Valley, Antarctica. *Arctic, Antarctic & Alpine Res.* 40 (2), 279-286.
- 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, pp. 169-181.
- Bockheim, J.G., Tarnocai, C., 1998. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma* 81, 281–293.
- Bockheim, J.G., Wilson, S.C., Leide, W.J., 1990. Soil development in the Beardmore Glacier Region, Antarctica. *Soil Science* 149 (3) 144-157.

CAPÍTULO 4

Active layer thermal monitoring of a Dry Valley of the Ellsworth
Mountains, Continental Antarctica

1. Introduction

The Ellsworth Mountains

Therefore, much of the permafrost in interior Antarctica is 'dry' (Bockheim and Tarnocai, 1998; Bockheim, 2002).

A complete model describing the genesis of dry permafrost is yet to be achieved, though speculations point to materials deposited by dry-based glaciers that undergo ice loss through sublimation over time, in a cold and arid environment (Black and Berg, 1963; Ugolini and Bull, 1965; Ugolini, 1964; Bockheim and Tarnocai, 1998). Dry permafrost occurs throughout the dry valleys of the Transantarctic Mountains in southern Victoria Land, especially at elevations below 900 m (Cameron, 1969). In some cases, ice-cemented permafrost exists below dry permafrost to depths approaching 1,000 m (Cartwright et al., 1974; Decker and Bucher, 1977).

Active layer depths in drift sheets of the Ellsworth Mountains range from 15 to 50 cm and the entire area is underlain by continuous permafrost of unknown thickness (Bockheim and Schaefer, 2015). Based on data collected from 22 pits, 41% of the sites contained dry permafrost below 70 cm, 27% had ice-cemented permafrost within 70 cm of the surface, 27% had bedrock within 70 cm, and 5% contained an ice-core (Bockheim and Schaefer, 2015). The thermal regime of permafrost at the Ellsworth is unknown.

The lack of information about permafrost is applicable to most of Antarctica, with the possible exception of the McMurdo Dry Valleys, where substantial research has taken place over the past several decades (Vieira et al., 2010). Elsewhere in Antarctica, permafrost research has been less systematic. Additionally, there has not been a coordinated effort to monitor permafrost properties and active-layer dynamics, except by individual countries and researchers, mostly in the vicinity of their research stations (Vieira et al., 2010). Such initiative is uncommon on remote continental areas such as the Ellsworth Mountains due to difficulties regarding installation and maintenance of the monitoring equipments.

The comprehension of the properties, thermal regime and distribution of Antarctic permafrost, including dry permafrost, is crucial to monitor and predict climate induced changes.

We studied the thermal regime of two contrasting sites with cold desert soil at the largest dry valley at Mount Dolence, Ellsworth Mountains, where no information on permafrost and active layer is available. This study is an essential part of the

'Antarctic and sub-Antarctic Permafrost, Periglacial and Soil Environments' (ANTPAS) project, coordinated by the International Permafrost Association's working group on Antarctic Permafrost and Periglacial Environments and the Scientific Committee on Antarctic Research Expert Group on Permafrost and Periglacial Environments, aims at addressing key issues of Antarctic permafrost science (Bockheim, 2004).

2. Materials and Methods

2.1. Setting

The mean annual air temperature along the Transantarctic and Ellsworth Mountains, ranges from -15 to -20 °C in coastal areas, to -35 °C along the polar plateau; the average annual accumulation of water-equivalent precipitation likely ranges from 150 to 175 mm year⁻¹ (Bockheim and Schaefer, 2015). Elevation and the proximity to the surrounding ice shelf are the main variables controlling climate. The vegetation cover is very rare, and restricted to a few lichen in the highest mountains (Øvstedal and Schaefer, 2013; Bockheim and Schaefer, 2015).

Geological formations include the Late Precambrian Minaret Group (marble), the middle to late Cambrian Heritage Group (sedimentary rocks), the upper Cambrian to Devonian Crashsite Group (predominantly quartzites), the Permo-Carboniferous Whiteout Conglomerate, and the Permian Polestar Formation (marine and terrestrial tillites) (Webers et al. 1992). At the study site, Mount Dolence, quartzites prevail, together with occasional phyllites. Locally, a drift deposit covers bedrock with depth between 25-105 cm.

2.2. Permafrost and active layer monitoring

Fieldwork was performed in 2012/2013, and soil pits were excavated to at least 100 cm depth to ice or ice-cemented permafrost was determined. The active layer (seasonal thaw) in the study areas varied between 15 and 50 cm; material below this depth that is not cemented by ice contains dry-frozen permafrost.

Two adjacent active layer monitoring sites were installed at Mount Dolence, Ellsworth Mountains (79°49'18,5''S / 83°11'49,7''W), in the summer of 2012, according to Figure 2. Two dry-valley soils on quartzite drift deposits were studied: (i) a convex-slope site with wind exposed face (Lithic Haplorthel 886 m asl, 5 cm, 10 cm, 30 cm);

and a sheltered concave-slope site protected from winds (Lithic Anhyorthel 850 m asl, 5 cm, 10 cm, 30 cm).

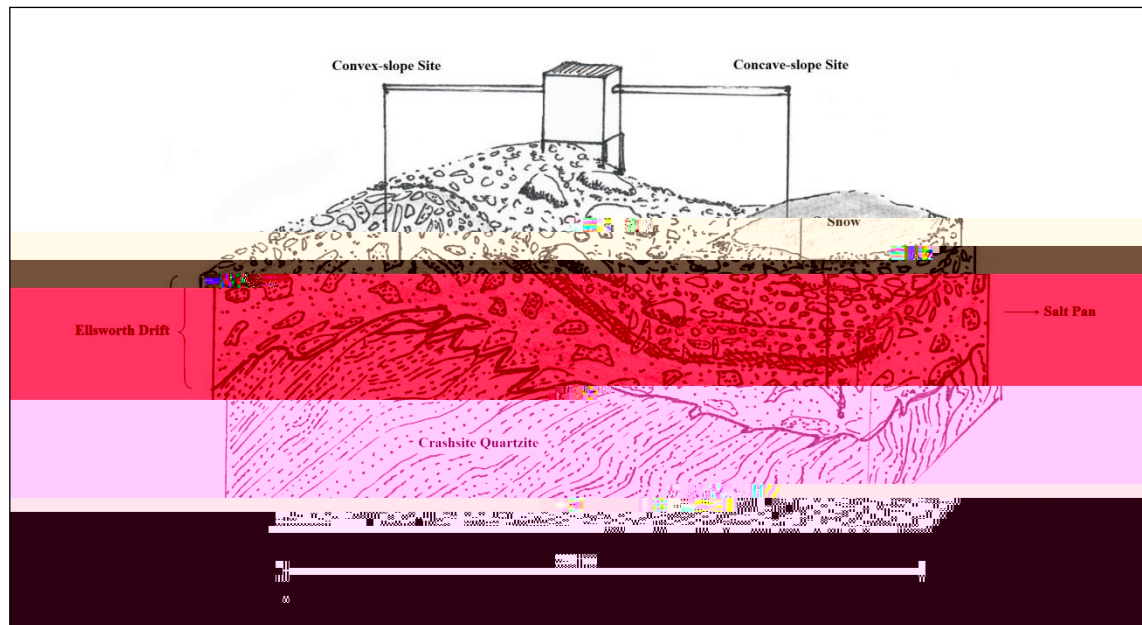


Figure 2: Diagram of the studied site

They consist of thermistors (accuracy ± 0.2 °C) (model 107 Temperature Probe, Campbell Scientific Inc, Utah, USA) installed at 1 m above ground for air temperature measurements at two soil profiles, arranged in a vertical array at different depths down to the permafrost table. All probes were connected to a data logger (model CR 1000, Campbell Scientific Inc, Utah, USA) recording data at hourly intervals from January 2nd 2012 until December 29th 2013.

The characteristics of the monitored sites and the exact depth of the probes are presented in Tables 1 and 2. We calculated the *thawing days* (days in which all hourly soil temperature measurements are positive and at least one reading is warmer than 0.5 °C), *freezing days* (days in which all hourly soil temperature measurements are negative and at least one reading is colder than -0.5 °C), *isothermal days* (days in which all the hourly measurements range only between ± 0.5 °C), *freeze-thaw days* (days in which there are both negative and positive temperatures with at least one value higher than 0.5 °C or lower than -0.5 °C), *thawing degree days* (TDD, obtained by the cumulative sum of the mean daily temperatures above 0 °C) and *freezing degree days* (FDD, obtained by the cumulative sum of the mean daily temperatures below 0 °C) according to Guglielmin et al. (2008). The active-layer thickness (ALT) was calculated as

the 0 °C depth by extrapolating the thermal gradient from the two deepest temperature measurements (Guglielmin, 2006). A freezing “n-factor” (FNF) (Klene et al., 2001) was calculated considering the ratio of the sum of freezing degree 164 days at the soil-surface to 165 that in the air for each month (usually the n-factor is defined as the ratio of the sum of 166 thawing degree days at the soil-surface to that in the air).

The apparent thermal diffusivity (ATD) was estimated for different seasons from the 168 equation of McGaw et al. (1978):

$$\alpha = [\Delta Z^2 / 2\Delta t] \times [(T_{ij+1} - T_{ij-1}) / (T_{ji-1} - 2T_{ji} + T_{ji+1})] \quad (01)$$

where α = apparent thermal diffusivity ($m^2 s^{-1}$), Δt = time increments (s), ΔZ = space increments (m), T = temperature, j = temporal position and i = depth position. Nelson et al. (1985), Outcalt and Hinkel, (1989), Hinkel et al. (1990, 2001) have used this estimative to assess the resistance to energy flux in the profile. Hourly estimations were made for intermediate depths of both profiles, and mean values were calculated and plotted for each day.

A series of statistical analysis were performed to describe the soil temperature time series. The Box–Pierce test and augmented Dickey–Fuller tests were performed to confirm the stationarity and independent distribution of the time series (data not shown). The histogram (frequency distribution of temperature readings) and first difference (the difference between consecutive hourly temperature readings) were plotted, and the time series was decomposed into its seasonal and trend components by locally weighted smoothing (Loess) using a window of 25.

Table 1: General characteristics of the monitored site.

Site	Altitude	Soil Class	Soil Taxonomy	Lat./Long.	ALT *	Thermistor depth
P1	886 m	Lithic	Haplorthel	79°49'18,5" S / 83°11'49,7" W	102.5 cm (2012); 117.5 (2013);	5 cm 10 cm 30 cm
P2	850 m	Lithic	Anhyorthel	79°49'14,5" S / 83°11'42,7" W	102.5 cm (2012); 117.5 (2013);	5 cm 10 cm 30 cm

*ALT- Active Layer Thickness

Table 2: Depth, color and texture of the soil horizons of the studied profiles.

Hor.	Depth (cm)	Color	CS FS Silt Clay				Textural Class	
			dag.kg ⁻¹					
P1								
Cnz	6-12	5Y 8/2	Pale yellow	73	10	11	6	Loamy-sand
Cnff1	12-20	5Y 8/1	White	79	6	12	3	Loamy-sand
Cnff2	20-25	5Y 8/1	White	77	9	11	3	Loamy-sand
P2								
Cnf1	0-6	5Y 7/2	Light gray	75	12	10	3	Loamy-sand
Cnf2	6-25	5Y 5/2	Light gray	82	7	8	3	Loamy-sand

* CS=Coarse Sand (2–0,2 mm), ** FS=Fine Sand (0,2–0,05 mm), Silt (0,05–0,002 mm), Clay (< 0,002 mm)

3. Results

Temperature at 5 cm reaches a maximum daily average in late December 2012, reaching a minimum in mid July 2013 on P1 (10.9 °C, -37.9 °C, \pm 11.1) and P2 (6.9 °C, -37.1 °C, \pm 10.2) (Table 3) (Figure 3). The active layer thickness reaches a maximum of 48.4 cm at P1 on January 17th 2013 and 47.8 cm at P2 on January 7th 2012. No ID were recorded for the studied period; one TD was recorded at 5 cm on P2, 143 FTD were recorded at 5 cm, 81 at 10 cm and 46 days at 30 cm on P1, on P2 118 FTD were recorded at 5 cm, 80 at 10 cm and 42 days at 30 cm.

Table 3: Monthly averages for Air ant soil temperature at P1 and P2.

Temp	P1 5cm	P1 10cm	P1 30cm	P2 5cm	P2 10cm	P2 30cm	AIR
Jan-12	-3.30	-4.54	-5.40	-4.53	-5.58	-5.92	-9.97
Feb-12	-8.76	-8.92	-8.99	-8.83	-9.24	-9.20	-11.61
Mar-12	-16.87	-15.79	-14.98	-16.41	-15.96	-15.15	-17.95
Apr-12	-26.61	-24.50	-22.92	-25.55	-24.26	-22.78	-25.70
May-12	-25.20	-24.13	-23.36	-24.60	-23.94	-23.15	-24.12
Jun-12	-27.48	-26.37	-25.57	-26.91	-26.24	-25.47	-26.22
Jul-12	-29.01	-27.68	-26.74	-28.39	-27.53	-26.55	-28.61
Aug-12	-29.41	-28.51	-27.89	-29.08	-28.34	-27.60	-28.93
Sep-12	-28.57	-27.96	-27.47	-28.08	-27.62	-27.23	-27.54
Oct-12	-18.74	-20.19	-21.15	-19.32	-20.06	-20.93	-20.11
Nov-12	-8.66	-11.39	-13.34	-10.60	-12.17	-13.56	-14.03
Dec-12	1.95	-1.92	-4.83	-1.15	-3.26	-5.23	-5.90
Avg 2012	-18.39	-18.49	-18.55	-18.62	-18.68	-18.56	-20.06
Jan-13	0.49	-1.33	-2.56	-1.25	-2.79	-3.11	-6.69
Feb-13	-9.42	-9.24	-9.01	-9.56	-9.76	-9.48	-14.41
Mar-13	-15.52	-14.72	-14.04	-15.25	-14.51	-14.09	-16.84
Apr-13	-23.68	-21.71	-20.18	-23.34	-21.12	-20.09	-23.36
May-13	-26.53	-24.97	-23.80	-26.06	-24.48	-23.69	-25.08
Jun-13	-25.39	-24.73	-24.24	-25.05	-24.43	-24.14	-23.55
Jul-13	-31.30	-29.16	-27.55	-30.80	-28.63	-27.54	-29.59
Aug-13	-27.01	-26.49	-26.14	-26.73	-26.21	-25.98	-25.51
Sep-13	-25.70	-25.65	-25.56	-25.34	-25.39	-25.40	-24.24
Oct-13	-20.89	-21.48	-21.81	-20.62	-21.33	-21.50	-22.02
Nov-13	-11.08	-13.34	-15.13	-11.80	-14.18	-15.25	-14.67

Dec-13	-0.93	-4.01	-6.66	-2.55	-5.58	-6.94	-7.59
Avg 2013	-18.08	-18.07	-18.06	-18.20	-18.20	-18.10	-19.46
Global Avg	-18.23	-18.28	-18.31	-18.41	-18.44	-18.33	-19.76

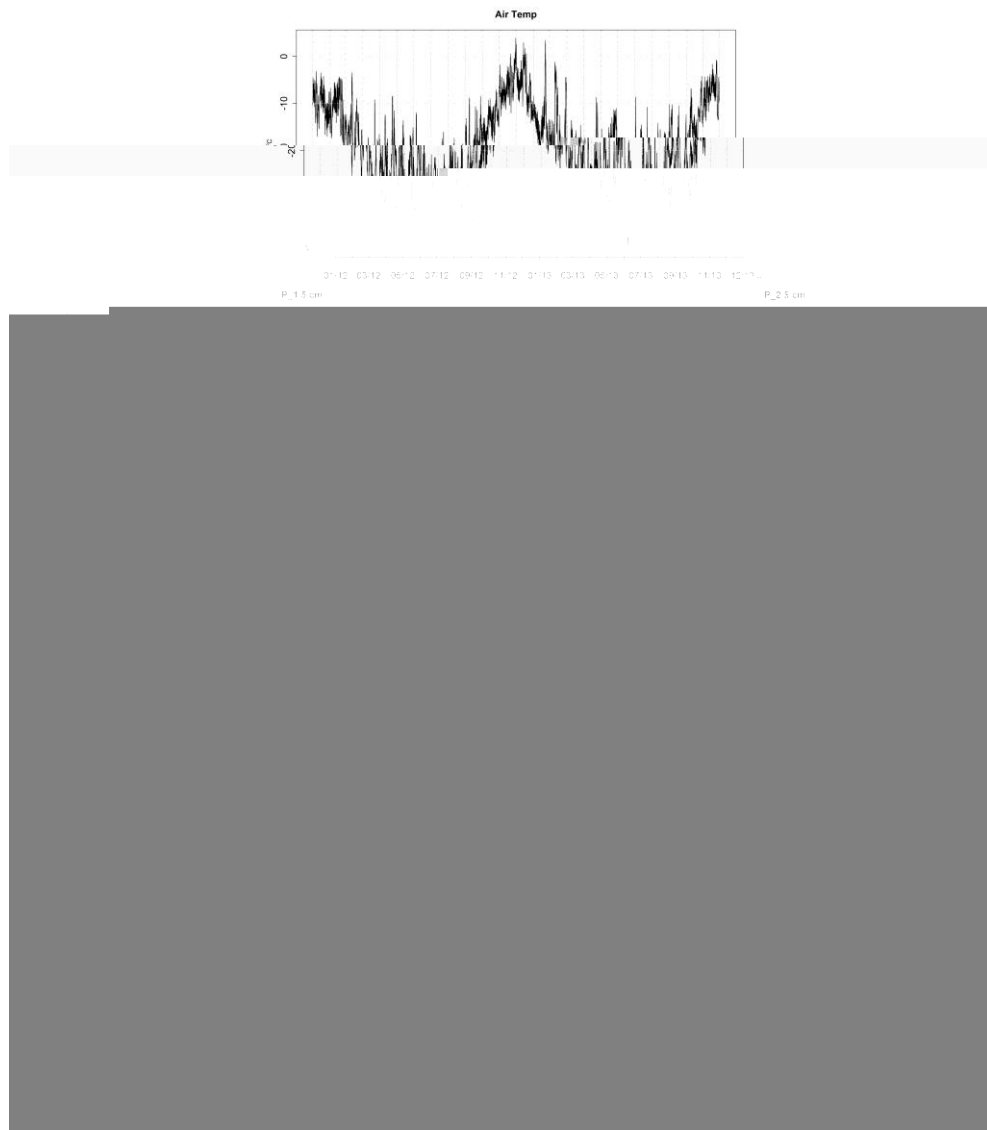


Figure 3: Hourly air and soil temperature data at P1 and P2.

The majority of the days were classified as FD for both sites; 585 at 5 cm, 647 at 10 cm



Figure 4: Thawed days, Frozen Days, Isothermal days and Freeze thaw days recorded for P1 and P2.

No positive daily average was recorded at 30 cm for both sites. The sum of all negative daily average temperatures was -13504.5 FDD at 5 cm, -13389.9 FDD at 10 cm and -13381.0 FDD at 30 cm on P1, -13508.0 FDD at 5 cm, -13486.6 FDD at 10 cm and -13398.9 FDD at 30 cm on P2. A negligible sum of 0.28 TDD was observed for the air temperature, with -14430.7 FDD (Figure 5).

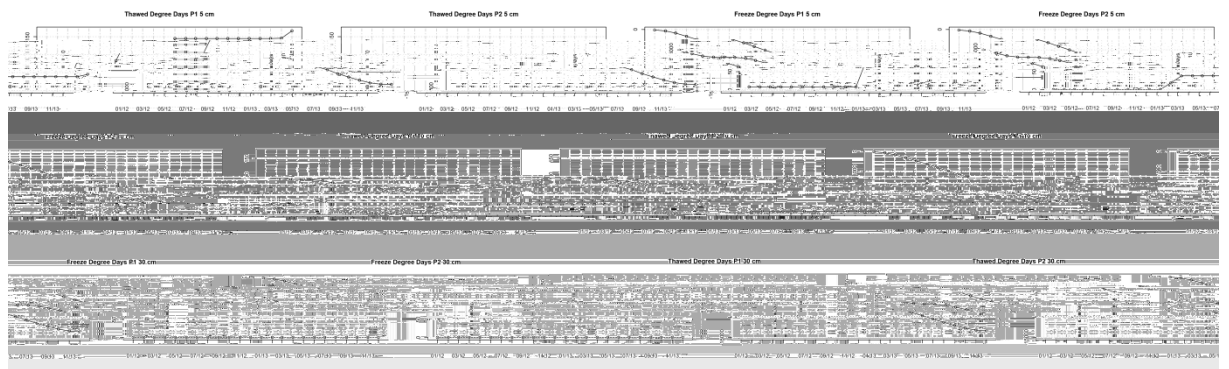


Figure 5: Thawed degree days and freeze degree days at P1 and P2.

Soil moisture regime for both profiles polar is aridic, with readings always below 10 % water. The exposed soil P1 has 2% of moisture during most of the studied period, reaching a maximum of 3%. The sheltered soil P2 has a more variable behavior, with readings below 2 % in most of 2012 and between 2 and 3 % during 2013, with some small fluctuations in the summer season (close to 10%), indicating water redistribution at very short spells (Figure 6).

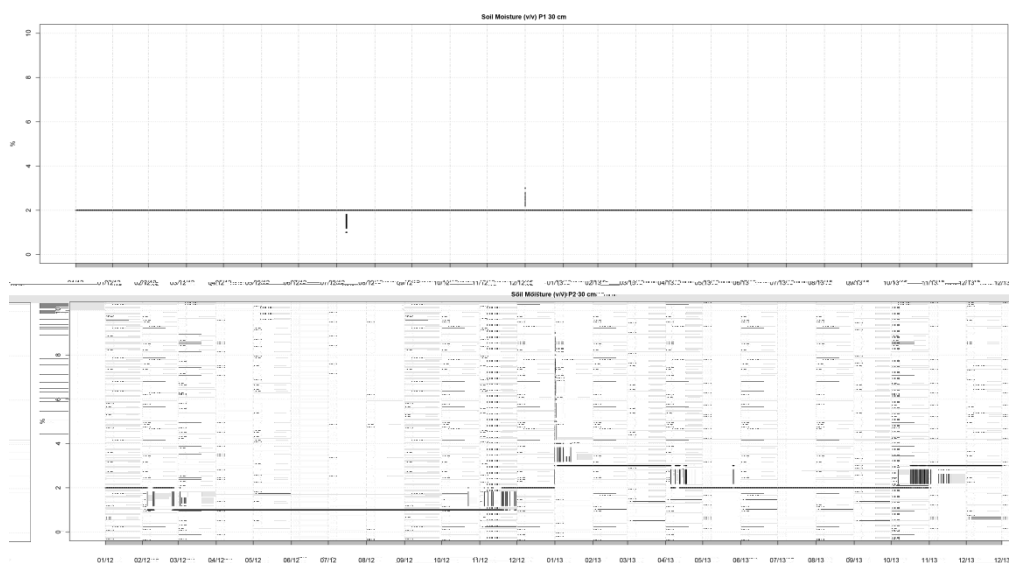


Figure 6: Soil moisture (v/v), at p1 and p2.

The estimated ATD for the studied period followed similar tendencies for both soils, although global average values were $-1.5E-4$, $3.0E-5$. Monthly values were frequently positive for milder seasons and negative at the peak of winter and summer for both sites, negative values were higher at the highest, more exposed site (P1). When calculated for each season, the spring presents the greatest values (around $-1.5E+01$), while the summer has the smallest values (around $-8.2E+00$). Histograms show a greater frequency of temperatures around $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in surface for both profiles whereas at 10 and 30 cm temperature readings were mostly around -20 and $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. The FNF varied greatly, values close to 1 are concentrated in the winter months and values around 0.25 are recorded at the warmer months (Figure 7).

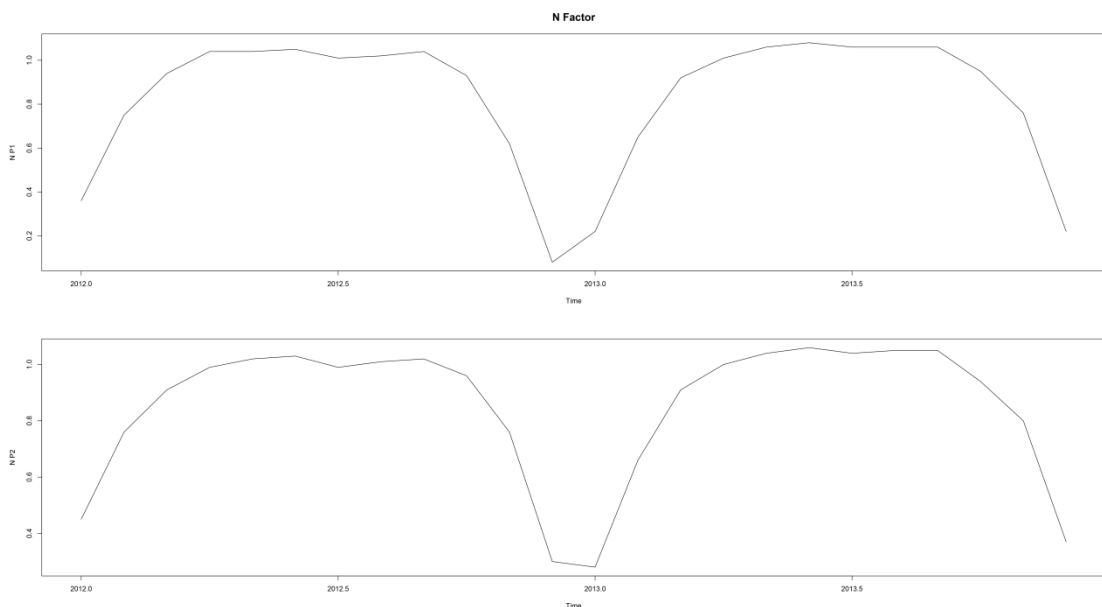


Figure 7: Freezing “n-factor” at p1 and p2.

The additional decomposition of the hourly time series showed a similar behavior for both soils, a seasonal component with greater amplitude during the summer. The sheltered site P2 showed a more erratic behavior, with amplitude close to $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figure 8). The remaining fluctuates between -4 and $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, more intensely during the summer months. First difference plots illustrates how intense hourly temperature changes are, with common variation around $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ being more intense during the summer, although winter values can reach $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ even at deeper layers (Figure 9).



Figure 8: Additional decomposition of the hourly time series at P1 and P2.



Figure 9: First difference plot of the hourly soil temperature data at P1 and P2.

Multivariate regressions (dependent on air, 5 cm and 10 cm layers) were employed to estimate the temperature at 30 cm with good equation estimates (Table 4). The adjusted R-squared was 0.98 for both sites, and standard errors for the coefficients were within an acceptable range. The closest overlying layer (10 cm) influenced the prediction greatly, whereas higher coefficients were found for air and 5 cm layer for the sheltered soil (P2); overall the contribution of air and topsoil temperatures (5 cm) was small (Figure 10). All coefficients were statistically significant. The equations proposed for both sites effectively predicted temperatures at the bottom layer, overestimating temperature peaks. Maximum and minimum residuals were 3.71, 4.39 and -4.60, -4.55 for P1 and P2 respectively.

Table 4: Parameters and

The first diagnostic plot (Figure 11) seems to indicate that the residuals and the fitted values are not normally distributed. The qtqnd towf

ATD can be interpreted for all seasons since there is little influence of soil moisture and water percolation in the profile. Results suggest that P2 is less resistant in transmitting energy, though the actual thermal conductivity of both profiles is very similar. High negative values for P1 in summer and winter are caused by its exposed position; which allows great warming at the surface in the summer, and cooling in winter. At milder seasons, the energy flow remains the same, but larger values of ATD are calculated due to smaller differences in temperature in the profile. The classification of the daily temperature cycle also suggests that P2 is colder, since it recorded more FD on the studied period for all layers. The cumulative sum of temperatures reveals remarkably similar results; differences in landscape position are canceled out, since P 1 is warmer in summer and colder in winter.

Soil water content varied according to the different positions of the profiles. P1 presented lower values and very small fluctuations due to its more exposed position. P2 recorded lower values for 2012 and higher values for 2013, with more intense variations, peaking unusual 10% water in January 2013. Overall the water content is very low and had little influence on the temperature regime of both profiles.

The absence of the zero curtain regime changes the distribution of the temperature readings, concentrating most of the readings at the -30 to -20 °C range hence, the energy flow in the profile depends only on the conductivity of its constituents and the insulating effect of air in its pores, as suggest Vieira et al. (2012). The absence of snow is noticeable, and the evolution of the freezing n-factor during the year is extreme; values are very close to 1 during winter, decreasing to nearly zero during the summer. The small values found in the summer are not caused by any insulation effect of snow cover, but are due to direct solar energy input, preventing strong temperature fall in surface. Summer is also when both sites show different values, always smaller at P2. Winter values close to 1 suggest great influence of air temperatures on ground temperatures.

The additive decomposition of the time series allows an analysis of the different components of the data. The seasonal component yields the variation in the data near the seasonal frequency, in our case one cycle per day. The trend component illustrates the low frequency variation in the data together with no stationary, long-term changes. The decomposition of the time series reveals great seasonal component

associated with the summer, especially for 2014, with larger amplitude at P1, decreasing with depth. The daily trend fits well as a smoothed time series, similarly for all depths at both sites. Most of the noise is concentrated in the warmer months although the low moisture content allows great variation throughout the year; noise amplitude is similar for all horizons.

The equations proposed through stepwise regression presented satisfactory adjust to the recorded data, helping us to understand the linear effect of each independent variable in predicting temperature of the bottom layer (dependent variable). It also reflects how the energy flows from the atmosphere to the soil. Little overestimation is observed near peak values, with a uniform behavior throughout the studied period. Slight difference is observed between sites the sheltered site; P2 presented a better fit with greater influence of the 5 cm layer due to smaller temperature fluctuations at the surface.

5. Conclusions

The soil thermal regime at the dry valley of Mount Dolence, Ellsworth Mountains is characteristic of polar desert affected by Dry-frozen permafrost. Although air temperature does not reach high positive values, variations in soil temperature are more intense during the summer, showing the soil's response to solar radiation.

The periglacial landform features such as garlands, stone stripes and pattern-ground observed at the surface of both sites, are not in phase with the present polar cold desert climate, and may be related to past warmer events. The present negligible amount of liquid water is unlikely to produce the prominent periglacial features observed.

The concave-sheltered site with a salt-pan surface is more prone to temperature extremes than the convex-exposed site.

The active-layer is subjected to strong sublimation of water, so that subsurface moisture content and redistribution are negligible.

The thermal regime of dry permafrost at the Ellsworth is comparable to other continental areas such as the dry-valleys of Victoria Land.

References

- Black, R.F., Berg, T.E., 1963. Hydrothermal regimen of patterned ground, Victoria Land, Antarctica. International Association of Science, Hydrology Commission of Snow and Ice, Publication 61, pp. 121–127.
- Bockheim, J.G., 1993. Global change and soil formation in Antarctica. In Joint Russian-American Seminar on Cryopedology and Global Change, pp. 132–140. Russian Academy of Sciences, Pushchino.
- Bockheim, J.G., 1995. Permafrost distribution in the Southern Circumpolar Region and its relation to the environment: a review and recommendations for further research. *Permafrost and Periglacial Proc.* 6, 27–45.
- Bockheim, J.G., 2002. Landform and soil development in the McMurdo Dry Valleys: a regional synthesis. *Arctic, Antarctic & Alpine Research* 34, 308-317.
- Bockheim J.G., 2004. International Workshop on Antarctic Permafrost and Soils, November 14-18, 2004, University of Wisconsin, Madison, WI. Final report submitted to Office of Polar Programs, Antarctic Section, National Science Foundation, Project OPP-0425692.
- Bockheim, J.G., Tarnocai, C., 1998. Nature, occurrence and origin of dry permafrost. In: Lewkowicz, A.G., Allard, M. Proc. (Eds.). Seventh International Conference on Permafrost. Collection Nordica (Université Laval) 57 pp. 57–64.
- 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, pp. 169-181.
- Cameron, R.E., 1969. Cold desert characteristics and problems relevant to other arid lands. In: McGinnies, W.G., Goldman, B.J. (Eds.). *Arid Lands in Perspective*. University of Arizona Press, Tuscon, pp.168-205.
- Campbell, I.B., Claridge, G.G.C., Balks, M.R., 1994. The effect of human activities on moisture content of soils and underlying permafrost from the McMurdo Sound region, Antarctica. *Antarctic Sci.* 6, 307–314.
- Cartwright, K., Harris, H., Heidari, M, 1974. Hydrogeological studies in dry valley. *Antarctic Journal of the United States* 9, 131-133.
- Decker, E.R., Bucher, G.J., 1977. Geothermal studies in Antarctica. *Antarctic Journal of the United States* 12: 103–104.
- Guglielmin, M., 2006. Ground surface temperature (GST), active layer, and permafrost monitoring in continental Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes* 17(2), pp. 133–143.
- Guglielmin, M., Ellis Evans, C.J., Cannone, N., 2008. Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica). *Geoderma* 144, 73–85.
- Hinkel, K. M., Outcalt, S. I., Nelson, F. E., 1990. Temperature variation and apparent thermal diffusivity in the refreezing active layer, Toolik Lake, Alaska, *Permafr. Perigl. Proc.* 14, 265–274.
- Hinkel, K. M., Paetzold, F., Nelson, F. E., and Bockheim, J. G., 2001. Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993–1999, *Glob. Planet. Change.* 29, 293–309.
- Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I., 2001. The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk river basin, Alaska, U.S.A. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 33 (2), 140–148.

- McGaw, R. W., Outcalt, S. I., Ng, E., 1978. Thermal properties and regime of wet tundra soils at Barrow, Alaska. Third International Conference on Permafrost, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 47–53.
- Nelson, F.E., Outcalt, S.I., Goodwin, C.W., Hinkel, K.M., 1985. Diurnal thermal regime in a peat-covered palsa, Toolik lake, Alaska. *Arctic* 38 (4), 310–315.
- Outcalt, S. I., Hinkel, K. M., 1989. Night frost modulation of near surface soil–water ion concentration and thermal fields, *Phys. Geogr.* 10, 336–346.
- Øvstedal, D.O., Schaefer, C.E.G.R., 2013. A new lichen species from the Heritage Range, Ellsworth Mountains, Antarctica. *Hoehnea* 40(2) 361-364.
- Ugolini, F.C., 1964. Soil investigations in the lower Wright Valley, Antarctica. Proceeding of the First International Permafrost Conference. National Academy of Sciences, National Research Council. Publication 1287, pp. 55-61.
- Ugolini, F.C., Bull, C., 1965. Soil development and glacial events in Antarctica. *Quaternaria* 7, 251-269.
- Vieira R., Hinata S., Rosa K.K., Zilberstein S. and Simões J.C., 2012. Periglacial features in Patriot Hills, Ellsworth Mountains, Antarctica. *Geomorphology* 155-159 96-101.
- Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A.A., Boelhouwers, J., Cannone, N., Ganzert, L., Gilichinsky, D.A., Goryachkin, S., López-Martínez, J., Meiklejohn, I., Raffi, R., Ramos, M., Schaefer, C., Serrano, E., Simas, F., Sletten, R., Wagner, D., 2010. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the International Polar Year 2007–09. *Permafrost Periglac. Process.* 21 (2), 182–197.
- Vieira R., Hinata S., Rosa K.K., Zilberstein S. and Simões J.C., 2012. Periglacial features in Patriot Hills, Ellsworth Mountains, Antarctica. *Geomorphology* 155-159 96-101.
- 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, Memoir 170, Boulder, Colorado*, pp. 1-8.

CONCLUSÕES GERAIS

Os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth possuem características típicas de solos de deserto polar e se assemelham grandemente com solos de outras regiões desérticas da Antártica.

Foi proposto um modelo para a gênese da estrutura dos solos de deserto polar, que, a partir do qual, estrutura em blocos, maciça e em grãos simples forma-se em função da presença de ciclos de congelamento e descongelamento e sais.

A incipiente colonização pela vegetação em Ellsworth é bastante dependente da maior disponibilidade de água, menor salinidade e da presença de guirlandas de pedra na superfície do solo capazes de proteger os líquens contra a ação erosiva dos fortes ventos catabáticos.

A mineralogia dos solos de Ellsworth demonstra a grande relação genética entre os solos e os materiais de origem subjacente. Entretanto, a assembleia mineralógica dos solos analisados não apresentou grande variação entre os diferentes materiais parentais, já que o clima extremamente frio e severamente árido determina baixos níveis de intemperismo químico e pedogênese. Assim, o intemperismo e a pedogênese nas Montanhas Ellsworth está altamente condicionada ao clima e a natureza recente das superfícies de alteração locais.

A geomorfologia da área do vale glacial dos Montes Edson pode ser entendida a partir de três conjuntos de unidades de relevo distintas: (i) feições paraglaciais como glacial rochoso e feições associadas; (ii) feições supraglaciais como o sistema deposicional morânico; e (iii) feições periglaciais como solos com padrões. Todas essas feições estão relacionadas às variações do manto de gelo da Antártica Ocidental.

A umidade responsável pela formação do permafrost cimentado por gelo provém das zonas de ablação da geleira de gelo azul localizada na saída do vale glacial dos Montes Edson. No entanto, as feições periglaciais identificadas (solos com padrões, lagos de degelo, poças congeladas e termokarst) não são ativas, considerando as baixas temperaturas atualmente experimentadas por Ellsworth. Assim, é possível que estas feições sejam fruto de épocas pretéritas mais úmidas, quando as temperaturas ultrapassavam os 0 °C e os processos periglaciais eram mais ativos.

A cronossequência de solos revelou que os solos da porção sul das Montanhas Ellsworth se enquadram nos estágios 2, 3 e 3,5 de intemperismo, condizente com a região climática na qual Ellsworth se encontra. Os solos mais desenvolvidos de Ellsworth estão localizados em cotas altimétricas mais elevadas por se tratarem de superfícies mais antigas que estão expostas há mais tempo pela retração da geleira local.

O regime térmico dos solos desenvolvidos em Mount Dolence, Montanhas Ellsworth, é característico de solos de deserto polar afetados por permafrost seco. Embora a temperatura do ar não atinja elevados valores positivos, variações na temperatura do solo durante o verão são bastante intensas, reflexo da resposta do solo à radiação solar.