

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

**Regime Térmico da Camada Ativa na Península Keller,
Ilha Rei George, Antártica (2008-2011): Contribuição ao
Monitoramento de Ambientes Periglaciais**

Samara Salamene

2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**REGIME TÉRMICO DA CAMADA ATIVA NA PENÍNSULA KELLER,
ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA (2008-2011): CONTRIBUIÇÃO AO
MONITORAMENTO DE AMBIENTES PERIGLACIAIS**

SAMARA SALAMENE

Sob a Orientação do Professor
Márcio Rocha Francelino

Co-orientação do Professor
Gustavo Bastos Lyra

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor em
Ciências**, no Curso de Pós-Graduação
em Ciências Ambientais e Florestais,
Área de Concentração Conservação da
Natureza.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2013

631.409167

S159r

T

Salamene, Samara, 1981-

Regime térmico da camada ativa na Península Keller, Ilha Rei George, Antártica (2008-2011): contribuição ao monitoramento de ambientes periglaciais / Samara Salamene - 2013.

71 f. : il.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais.

Inclui bibliografias.

1. Solos - Análise - Antártica - Teses. 2. Solos - Temperatura - Antártica - Teses. 3. Solos - Umidade - Antártica - Teses. 4. Física do solo - Teses. I. Francelino, Márcio Rocha, 1966-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

SAMARA SALAMENE

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração Conservação da Natureza.

TESE APROVADA EM 27/02/2013

Márcio Rocha Francelino. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer. Dr. UFV

Elpídio Inácio Fernandes Filho. Dr. UFV

José Francisco de Oliveira Junior. Dr. UFRRJ

Rafael Coll Delgado. Dr. UFRRJ

*Aos meus queridos pais, Paulo e Rosalina,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A UFRRJ, pela oportunidade de estudar numa instituição pública, gratuita e de qualidade.

A coordenação e secretaria do PPGCAF, por tratarem não só a mim, mas a todos seus alunos, com respeito, presteza e prontidão.

Ao IFSP, meu atual empregador, por me liberar alguns dias da semana para que eu pudesse me dedicar a essa pesquisa.

Ao CNPq, pelo fomento.

Ao INCT-Criosfera e ao coordenador do Terrantar, prof. Carlos Ernesto Schaefer da UFV, pela oportunidade de participar de um projeto tão grandioso.

A Secirm/PROANTAR, pelo apoio logístico durante a Operação Antártica.

Ao prof. Antonio Batista da Unipampa, pela honra de me conceder uma vaga em seu acampamento na Antártica.

Aos companheiros antárticos, em especial à minha querida amiga e fiel escudeira Juliana Tostes.

Aos colaboradores do INPE - Santa Maria, Dr Ronald Buss, sua orientada Sherida Pinheiro e ao meteorologista Marcelo Santini, pelas dicas e auxílio nas análises de dados.

Ao co-orientador prof. Gustavo Lyra, pelo profissionalismo, atenção, prontidão e ensinamentos que foram essenciais para concretização deste trabalho.

Ao orientador prof. Márcio Francelino, pela motivação e entusiasmo contagiante, pela confiança, amizade e conselhos que certamente levarei para o resto da minha vida.

A meu companheiro Leandro Azevedo, pelo amor, carinho e dedicação.

A meus pequineses Lipi, Juju e Junior, pela cachorroterapia.

Aos amigos e familiares, em especial à minha mãe Rosalina, pelo apoio incondicional.

A Deus e a todas as forças ocultas que me guiam.

RESUMO GERAL

SALAMENE, Samara. **Regime térmico da camada ativa na Península Keller, Ilha Rei George, Antártica (2008-2011): contribuição ao monitoramento de ambientes periglaciais**. 60p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

O regime térmico da camada ativa acima do permafrost constitui num eficiente indicador dos efeitos das mudanças climáticas em ambientes periglaciais, uma vez que o solo está na interface com a atmosfera e diretamente relacionado à biota terrestre, o que justifica seu monitoramento. O objetivo geral do presente estudo foi analisar o regime térmico da camada ativa em seis sítios de monitoramento da Península Keller, na Ilha Rei George, Antártica Marítima. Foram instalados sensores de temperatura e de umidade em diferentes profundidades do solo. Obteve-se uma série contínua de dados no período de fevereiro/março de 2008 a janeiro/fevereiro de 2011. Foi realizada análise exploratória dos dados de temperatura do solo, com análise de agrupamento dos sítios. A principal característica que definiu os grupos foi a ocorrência de isolamento térmico ocasionado pela neve ou vegetação. A espessura da camada ativa e profundidade do permafrost de cada sítio foram estimadas por meio de regressão. A difusividade térmica ao longo do perfil de solo foi estimada com os parâmetros obtidos no ajuste do modelo de temperatura do solo. Os atributos do solo que influenciaram na difusividade foram matéria orgânica e textura. Nos solos mais argilosos ou com maior quantidade de matéria orgânica a difusividade térmica foi menor. A difusividade térmica aumentou com a profundidade do solo e está relacionada com o conteúdo de água do solo. Observou-se um deslocamento na temperatura de congelamento da água no solo, sendo esse deslocamento maior nos solos com maior teor de sais. A análise de séries temporais mostrou os períodos de maior frequência: anual e intra-anual (estações do ano). Houve um período interanual com frequência significativa que pode estar associado à ocorrência do Modo Climático Anular Sul (SAM) na região durante o período estudado.

Palavras-chave: solos, temperatura, umidade, permafrost.

GENERAL ABSTRACT

SALAMENE, Samara. **Active layer thermal regime in Keller Peninsula, King George Island, Antarctica (2008-2011): contribution to periglacial environments monitoring.** 60p. Thesis (Doctorate in Environment and Forest Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

The thermal regime of active layer above the permafrost is an effective indicator of climate change effects in periglacial environments, because soil does interface with atmosphere and terrestrial biota, that justify its monitoring. This study objectived to analyze the active layer thermal regime in six monitoring sites localized on Keller Peninsula, King George Island, Maritime Antarctica. Temperature and moisture sensors were installed at different soil depths, making a continuous data series since February-March/2008 until January-February/2011. Cluster dendrogram was used to an exploratory data analysis of soil temperature in sites. The main feature that defined the groups was the occurrence of thermal isolation caused by snow or vegetation. The active layer thickness and permafrost depth were estimated for each site by regression. Thermal diffusivity through soil profile was estimated using the parameters obtained in model adjustment for soil temperature. Soil properties that influence the diffusivity were organic matter and texture. Soils with more clay or organic matter had a minor thermal diffusivity. Thermal diffusivity increased with soil depth and is related to soil water content. There was a displacement in temperature freezing point of soil water, and this displacement was greater in soils with higher salt content. Time series analysis showed periods of more frequency: annual and intra-annual (seasons). There was a between annual period with significant frequency that can be associated with the South Annular Mode (SAM), climatic mode that occurred in the region during the study period.

Key words: soil, temperature, moisture, permafrost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Antártica Marítima e Continental. As áreas em cinza destacam a ocorrência do permafrost na Antártica, e a cor preta representa as áreas livres de gelo (BOCKHEIM & HALL, 2002).	4
Figura 1.2 - Esquema básico de uma seção de solo com permafrost (WEATHER UNDERGROUND, 2013).	6
Figura 1.3 - Localização da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica.	7
Figura 1.4 - Modelo digital de elevação (a), áreas livre de gelo (b) e perfil topográfico (c) da península Keller (MENDES-JÚNIOR et al., 2012).	9
Figura 1.5 - Localização de seis sítios de monitoramento da península Keller: Cruzes, Ipanema, Refúgio, Tyrrel, VLF e Yellow. EACF = Estação Antártica Comandante Ferraz. Adaptado de Francelino (2004).	13
Figura 1.6 - Metodologia utilizada na instalação dos sítios de monitoramento: a) sensores instalados em diferentes profundidades; b) caixa com o <i>data logger</i> (a caixa fechada está com a bateria do sistema; c) estaca vermelha para visualização do sítio no campo (pedras servem para proteger a tampa das caixa contra o vento).	18
Figura 2.1 - Diagrama do regime térmico do permafrost, proposto por Brown (1970).	24
Figura 2.2 - Agrupamento dos sítios de acordo a média mensal de temperatura do solo a 10 cm de profundidade.	25
Figura 2.3 - Médias diárias da temperatura do solo (2008 a 2011) em seis sítios de monitoramento em Keller. Os períodos delimitados se referem a: camada ativa (CA), cortina zero (CZ), solo congelado (SC) e derretimento da neve (DN).	27
Figura 2.4 - Regime térmico da camada ativa (2008-2011) em seis sítios da península Keller. Reg = tendência da temperatura máxima (regressão linear).	28
Figura 3.1 - Médias mensais da temperatura do solo em diferentes profundidades e temperatura estimada através do ajuste do modelo.	35
Figura 3.2 - Validação do ajuste do modelo preditivo de temperatura do solo nos seis sítios.	36
Figura 3.3 - Relação entre difusividade térmica e profundidade dos solos de Keller.	38
Figura 3.4 - Distribuição da difusividade térmica da camada ativa nos sítios de Keller.	39
Figura 3.5 - Médias mensais de umidade do solo obtidos em quatro sítios de Keller.	40
Figura 3.6 - Relação entre temperatura e umidade do solo nos sítios de Keller.	40
Figura 3.7 - Difusividade térmica em função do volume de água no solo.	42

Figura 4.1 - Análise harmônica da temperatura do solo (Ts) em diferentes profundidades dos sítios de monitoramento de Keller.	47
Figura 4.2 - Análise espectral da série de temperatura do solo em diferentes profundidades dos sítios de monitoramento de Keller (2008-2011).	50
Figura 4.3 - Série de dados de temperatura do solo (Ts) dos sítios de Keller e índice SAM.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Variação térmica das regiões da Antártica e comparação com o Ártico (CONVEY, 2006)	5
Tabela 1.2 - Características gerais dos sítios de monitoramento da camada ativa em Keller	12
Tabela 1.3 - Análise textural próximos aos sítios de monitoramento da camada ativa em Keller (ALBUQUERQUE-FILHO, 2005)	14
Tabela 1.4 - Análise química dos solos da península Keller situados próximos aos sítios de monitoramento da camada ativa (ALBUQUERQUE-FILHO, 2005).	15
Tabela 3.1 - Valores obtidos para os parâmetros do ajuste do modelo de temperatura em diferentes profundidades do solo em Keller	38
Tabela 3.2 - Valores obtidos para os parâmetros do ajuste do modelo de temperatura <i>versus</i> umidade do solo nos diferentes sítios	41

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 - Caracterização da área de estudo e dos sítios de monitoramento da camada ativa	3
1.1 Introdução	3
1.2 Península Keller	7
1.2.1 Localização	7
1.2.2 Clima	7
1.2.3 Relevo	8
1.2.4 Geologia e geomorfologia	9
1.2.5 Solos	10
1.2.6 Vegetação	10
1.3 Sítios de Monitoramento	12
1.3.1 Localização dos sítios	12
1.3.2 Caracterização ambiental	13
1.3.3 Instalação dos sensores	17
1.3.4 Coleta de dados	18
1.4 Referências	19
CAPÍTULO 2 - Análise exploratória dos dados de temperatura do solo em seis sítios de monitoramento da península Keller	22
2.1 Introdução	22
2.2 Análise de dados	23
2.3 Resultados e Discussão	24
2.4 Conclusões	29
2.5 Referências	29
CAPÍTULO 3 - Difusividade térmica e modelagem da temperatura e umidade da camada ativa na península Keller	31
3.1 Introdução	31
3.2 Análise de dados	33
3.3 Resultados e Discussão	34
3.4 Conclusões	42
3.5 Referências	42
CAPÍTULO 4 - Análise de séries temporais para dados de temperatura do solo da península Keller - período de 2008 a 2011	44
4.1 Introdução	44
4.2 Análise de dados	45
4.3 Resultados e Discussão	46
4.4 Conclusões	54
4.5 Referências	55
CONCLUSÕES GERAIS	57
APÊNDICE – Fotos dos perfis de solo	58

INTRODUÇÃO GERAL

A Antártica (palavra de origem grega e que significa “oposto ao Ártico”) é a região mais fria, seca e com maiores velocidades de vento do planeta. A menor temperatura do ar registrada na Terra foi de -89°C na estação científica russa Vostok, situada no interior do continente.

Também chamada de “continente branco” ou “continente gelado” devido ao extenso manto de gelo que a recobre, a Antártica é o mais meridional dos continentes, consistindo num grande deserto frio e seco. Devido às suas condições ambientais extremas, é o único continente inabitado pelo homem e não pertence a nenhum País, sendo uma região destinada à paz, à ciência e à preservação ambiental. De acordo com o Tratado da Antártica, assinado atualmente por 31 países, até o ano de 2041 estão proibidas operações e instalações militares no continente, sendo este considerado um patrimônio da Humanidade.

O interesse dos países por esse continente se deu primeiramente pelo fato da sua localização estratégica mundial (expansão territorial) e por seus recursos naturais imensuráveis, ainda não explorados pelo homem. Posteriormente, muitas pesquisas revelaram a importância da Antártica no balanço energético e equilíbrio térmico da Terra, determinando as condições de vida no planeta. Devido ao seu isolamento e posicionamento geográfico, é uma das regiões mais sensíveis às mudanças climáticas globais. Além disso, evidências geológicas mostram relações do continente antártico com as demais regiões terrestres do Hemisfério Sul, de quando ainda estavam reunidos formando o supercontinente Gondwana.

As pesquisas na Antártica são limitadas por suas condições ambientais adversas. Além da extensa e espessa camada de gelo que a recobre, é uma das regiões mais elevadas do planeta, sendo sua altitude média de aproximadamente dois mil metros (SIMÕES, 2011). Somente com os avanços tecnológicos ocorridos no século XX é que se pode conhecer melhor essa região e, assim, contribuir para o conhecimento científico sobre a Criosfera.

A condição do Brasil como um país Atlântico, situado a uma relativa proximidade da região antártica (é o sétimo País mais próximo), e as prováveis influências dos fenômenos naturais que lá ocorrem sobre o território nacional, justificam o interesse brasileiro em estudar o continente austral.

A entrada do Brasil no Tratado da Antártica em 1975 deu início ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR, 1982), sendo a primeira Operação Antártica Brasileira (OPERANTAR) realizada no verão de 1982/1983. Essa operação abriu à comunidade científica nacional a oportunidade de participar em atividades que, juntamente com a pesquisa do espaço e do fundo oceânico, constituem as últimas grandes fronteiras da ciência internacional.

Nesse contexto, o núcleo de pesquisas sobre ecossistemas terrestres da Antártica (TERRANTAR), que integra o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera (INCT-Criosfera), realiza desde 2002 (quando projeto denominava-se Criossolos Austrais) pesquisas em áreas sob influência das massas de gelo e neve no planeta. Possui uma rede de monitoramento térmico do solo com mais de vinte e cinco sítios distribuídos na Antártica e na Cordilheira dos Andes, e contribui para o entendimento das variações climáticas globais. Dentre esses sítios, seis terão seus dados analisados e discutidos aqui nesse estudo, que compõe o projeto *Antarctic Permafrost And Soils* (ANTPAS), apoiado pelo *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR), que objetiva a caracterização, o mapeamento e o monitoramento do permafrost e da camada ativa nos solos da Antártica.

O objetivo geral do presente estudo foi analisar o regime térmico da camada ativa em diferentes sítios da Península Keller, situada na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica Marítima. Nessa mesma região está localizada a estação antártica brasileira

Comandante Ferraz. Esse estudo foi subdividido em quatro capítulos, cujos objetivos específicos foram:

- Capítulo 1 – Caracterizar a da área de estudo quanto aos solos, relevo, clima, vegetação, geologia e geomorfologia; descrever as principais características do solo nos locais onde foram instalados os sítios de monitoramento; descrever a metodologia para instalação dos sítios;
- Capítulo 2 – Agrupar os sítios de acordo com a temperatura do solo e identificar os principais fatores que determinaram o agrupamento; estimar a espessura da camada ativa e profundidade da superfície do permafrost;
- Capítulo 3 – Comparar os diferentes sítios através do ajuste do modelo de temperatura do solo; estimar a difusividade térmica nas diferentes profundidades do solo; identificar possíveis relações entre temperatura e umidade do solo, e também entre difusividade térmica e umidade do solo;
- Capítulo 4 – Realizar análise de série temporal para os dados de temperatura do solo dos seis sítios, a fim de identificar os períodos com maiores frequências; identificar possíveis anomalias no regime térmico da camada ativa e comparar com modo de variabilidade climática.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DOS SÍTIOS DE MONITORAMENTO DA CAMADA ATIVA

RESUMO

O objetivo desse capítulo foi apresentar as principais características da península Keller e dos sítios escolhidos para monitoramento da camada ativa do solo na Antártica Marítima, assim como descrita a metodologia utilizada para instalação desses sítios. A península Keller está situada na Baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica Marítima. Possui uma área total de 451,5 ha. Apresenta temperatura do ar média em torno de $-1,8^{\circ}\text{C}$ e precipitação anual de 366 mm. O relevo é acidentado, cuja maior elevação é o pico Bikenmajer, com 332,8 m. De forma geral, as geoformas dominantes na península são de natureza deposicionais, como o *scree slope*, o talus e as morainas, que ocupam quase 40% da área total. A formação de solos na Antártica se restringe às áreas livres de gelo, como é o caso de Keller. Os solos exibem características químicas fortemente relacionadas ao material de origem e são geralmente rasos e com elevado teor de cascalho, com predomínio de Cryosols e Leptosols. A cobertura vegetal ocorre em menos de 3% da sua área total, com presença de briófitas, líquens, além de duas espécies de plantas superiores: *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. e *Deschampsia Antarctica* Desv. Foram instalados nove sítios de monitoramento da camada ativa na península, dos quais seis foram utilizados nesse estudo por apresentarem séries contínuas de temperatura do solo de um período mínimo de três anos (2008-2011), obtidas em diversas profundidades. Os sítios foram equipados com sensores de temperatura e de umidade do solo acoplados a um sistema automático de aquisição e de armazenamento de dados (*data logger*), que foi programado para armazenar os dados a cada hora. Os sensores de temperatura foram colocados em diferentes profundidades do solo. Os resultados obtidos com essas séries serão discutidos nos próximos capítulos.

1.1 INTRODUÇÃO

A Antártica possui aproximadamente 13,8 milhões de quilômetros quadrados (62% maior que o território brasileiro), que representam cerca de 2% da superfície terrestre. Como não ocorre o derretimento da neve que precipita no interior do continente, ela se acumula através dos milênios, e forma um imenso manto de gelo e as geleiras (SIMÕES, 2011).

A curvatura da Terra e o ângulo de inclinação do seu eixo de rotação em relação ao plano de órbita, resultam no baixo aporte médio de radiação solar ao longo do ano e, conseqüentemente, ocasiona as baixas temperaturas das duas regiões polares. Na Antártica a perda energética é intensificada pela elevada altitude do continente (média de 1.958 m) e elevado albedo de sua superfície, que reflete em média 85% da radiação solar incidente, conseqüência direta da presença do manto de gelo. Em função de sua elevada altitude, o transporte de massas de ar para as latitudes maiores é dificultado, em contraste com o Ártico, onde tanto correntes atmosféricas, como oceânicas com temperaturas amenas, penetram até 80°N . Como conseqüência, um local na Antártica é, em média, 40°C mais frio do que um local de mesma latitude no Ártico, o que resulta num Hemisfério Sul mais frio e deslocamento do equador térmico em cerca de 5° para o norte do equador geográfico (SIMÕES, 2011).

Biogeograficamente, a região Antártica (abaixo de 60°S) pode ser subdividida em Marítima e Continental (Figura 1.1). A zona continental engloba a maior parte da Antártica, e

compreende toda a região do platô antártico, a cadeia de montanhas Transantárticas que corta o continente longitudinalmente, a costa oceânica (exceto a região que compõe a Antártica Marítima) e a parte oriental da península Antártica. A Antártica Marítima inclui as ilhas Sandwich, Orkney e Shetland do Sul e a costa oeste da Península Antártica até 72°S de latitude (CAMPBELL & CLARIDGE, 1988; CONVEY, 2006). Ocorrem ainda ilhas isoladas do continente austral, localizadas entre 50 e 60°S de latitude, que sofrem influência das frentes polares, como as ilhas Mcdonald, Heard e Georgia do Sul, e compõe a Zona Subantártica (CONVEY, 2006).

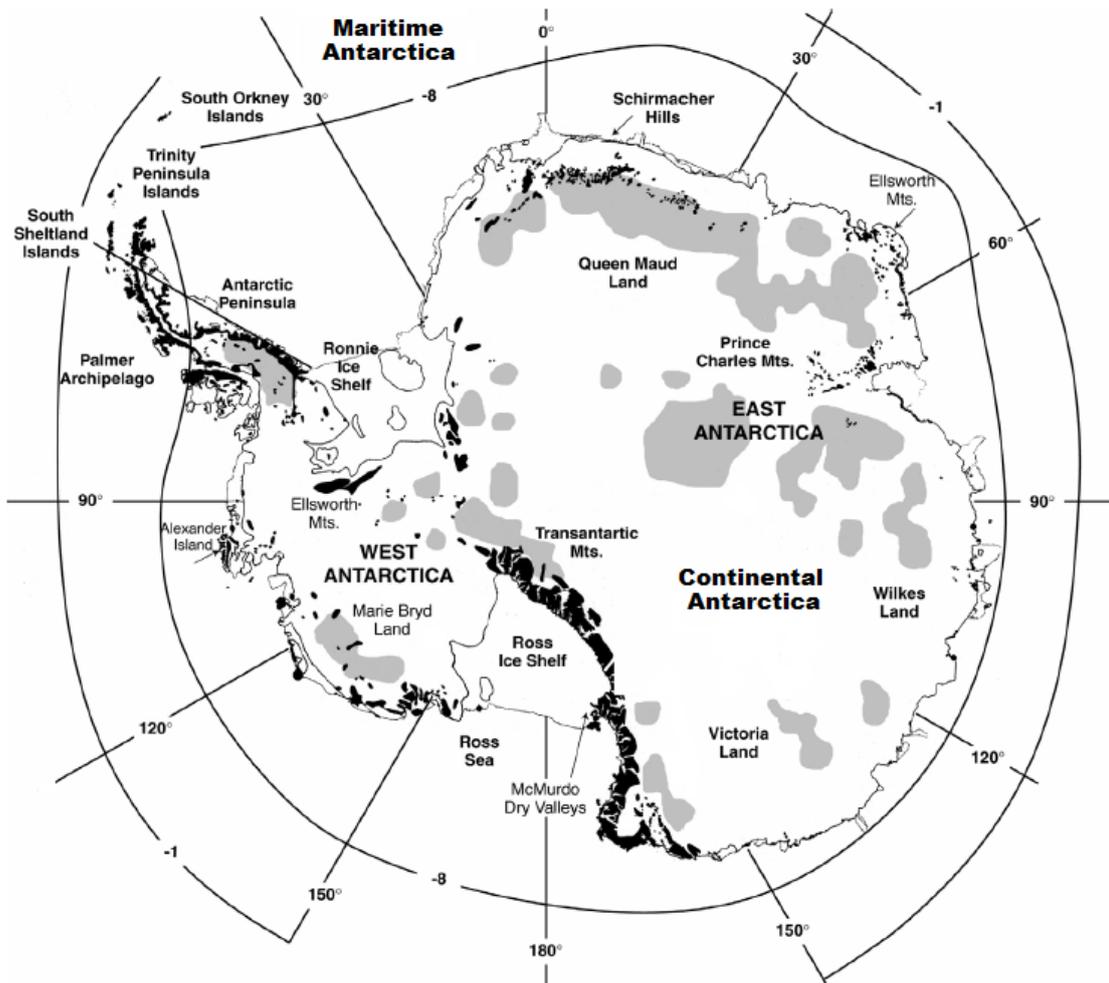


Figura 1.1 - Antártica Marítima e Continental. As áreas em cinza destacam a ocorrência do permafrost na Antártica, e a cor preta representa as áreas livres de gelo (BOCKHEIM & HALL, 2002).

As regiões da Antártica apresentam condições climáticas distintas (Tabela 1.1): na zona continental o platô antártico apresenta valores extremamente baixos de precipitação anual (menor que 30 mm, ou seja, equivalente às partes mais áridas do deserto do Saara, na África) e temperatura do ar com valores abaixo de -80°C no inverno, enquanto na Antártica Marítima a temperatura do ar média frequentemente é acima de 0°C no verão, e a precipitação anual nessa região pode chegar a 1.000 mm por ano (CAMPBELL & CLARIDGE, 1987; BÖLTER & BEYER, 2002; KEJNA, 2003).

Tabela 1.1 - Variação térmica das regiões da Antártica e comparação com o Ártico (CONVEY, 2006)

Região	Meses com temperatura do ar média positiva	Média da temperatura do ar no inverno e verão ($^{\circ}\text{C}$)	Extremos da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Dias com temperatura média do ar acima de 0°C
Extremo Ártico	2 a 4	-34 a +5	-60 a +20	50 a 350
Subantártica	4 a 6	-2 a +8	-10 a +25	70 a 170
Antártica Marítima	1 a 4	-12 a +2	-45 a +15	6 a 100
Antártica continental - costa	0 a 1	-30 a -3	-40 a +10	0
Antártica continental - interior	0	< -50 a -10	< -80 a -10	0

O arquipélago das Shetlands do Sul, situado a noroeste da Península Antártica, na Antártica Marítima, é formado por 29 ilhas, dentre as quais a Ilha Rei George, onde se localiza a estação antártica brasileira Comandante Ferraz. Em decorrência de sua posição geográfica (latitude 62°S), a ilha tem sua massa de gelo próxima do ponto de fusão, ou mesmo coincidente com ele, o que ocasiona significativa retração glacial, aumentando as áreas livre de gelo (BRAUN, 2001; ARIGONY-NETO et al., 2001).

A região da Baía do Almirantado, localizada ao sudeste da Ilha Rei George, apresenta características específicas de ambientes periglaciais (RAKUSA-SUSZCZEWSKI, 2002; FRANCELINO, 2004). Esses ambientes podem ser definidos como aqueles que ocorrem em regiões de elevada altitude e/ou latitude, onde os processos de intemperismo relacionados à ação do gelo (congelamento e descongelamento) são dominantes, afetados pela presença de permafrost (FRENCH, 1996).

A definição de permafrost, tradicionalmente, tem sido baseada na temperatura, como sendo substrato (solo, rochas, partes de rochas ou sedimentos inconsolidados) que apresenta temperatura abaixo de 0°C (estado criótico) por no mínimo dois anos consecutivos. A camada de permafrost pode ser contínua ou descontínua. Essas camadas podem estar intercaladas por uma camada descongelada do subsolo, denominada *talik* (Figura 1.2). Estima-se que o permafrost ocorra em 25% da superfície terrestre (FRENCH, 1996), e a Antártica contem 37% do permafrost do planeta (BOCKHEIM & HALL, 2002).

A camada do solo logo acima do permafrost, que está em contato direto com a atmosfera e sujeita a degelos cíclicos anuais, é denominada camada ativa. Em ambientes periglaciais, os solos derretem na primavera e verão, congelam no outono e permanecem congelados durante o inverno. A profundidade de penetração do gelo depende principalmente da intensidade do frio, sua duração, das propriedades físicas e térmicas do substrato, da vegetação e cobertura de neve (FRENCH, 1996; ANDRÉ, 2009).

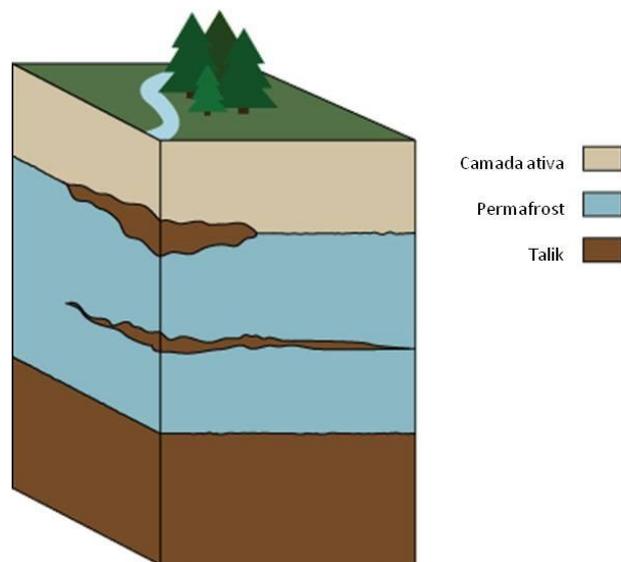


Figura 1.2 - Esquema básico de uma seção de solo com permafrost (WEATHER UNDERGROUND, 2013).

O aumento da temperatura ocasiona mudança na condição de permafrost contínuo para descontínuo, assim como a diminuição da sua espessura e conseqüente aumento da espessura da camada ativa do solo. Em decorrência, eventos de solifluxão (deslizamento do solo em massa) têm sido registrados, causando grandes desastres ambientais, principalmente no Hemisfério Norte, uma vez que nessa região há grandes cidades construídas sobre solos com permafrost (FRENCH, 1996). Além disso, a fusão do permafrost está associada à emissão de gases que contribuem para as mudanças no clima global, como o gás carbônico e o metano (WAGNER & LIEBNER, 2009; SCALA-JUNIOR et al. 2010). Por esses motivos, estudos sobre solos em ambientes periglaciais têm atraído a atenção da comunidade científica internacional.

O isolamento da Antártica e as suas condições climáticas extremas proporcionaram a formação de um ecossistema único no planeta, com equilíbrio ecológico bastante tênue, sendo altamente sensível às mudanças ambientais. A Antártica Marítima, por estar na periferia do continente, é uma eficiente indicadora dessas mudanças, fazendo-se necessário o monitoramento ambiental dessa região.

O monitoramento do permafrost e da camada ativa na Antártica é relativamente recente, e teve início em 1960 no sítio da Ilha Signy, que compõe o arquipélago das Orkney do Sul (CHAMBERS, 1967 *apud* GUGLIEMIN, 2012). Segundo Vieira et al. (2010), até o ano de 2010, existiam 73 sítios de monitoramento do permafrost e camada ativa espalhados por todo continente. Desses sítios, nove se encontram na Península Keller, localizada na Baía do Almirantado, ilha Rei George.

Nesse capítulo serão apresentadas as principais características ambientais da Península Keller e a descrição de seis sítios de monitoramento da camada ativa instalados nesse local. Essa caracterização buscou subsidiar a discussão dos principais resultados encontrados através do monitoramento, que serão apresentados nos demais capítulos.

1.2 PENÍNSULA KELLER

1.2.1 Localização

A península Keller está situada na ilha Rei George, Antártica Marítima, precisamente na região da Baía do Almirantado (Figura 1.3). A estação antártica brasileira Comandante Ferraz (EACF) está localizada na face leste dessa península.

A área total da Península é de aproximadamente 451,5 ha, com perímetro de cerca de 10.972 m e volume de $4,34 \times 10^{11} \text{ m}^3$. A distância total do seu eixo norte-sul é de aproximadamente 3.728 m e no eixo leste-oeste 1818 m (MENDES-JUNIOR et al., 2012).

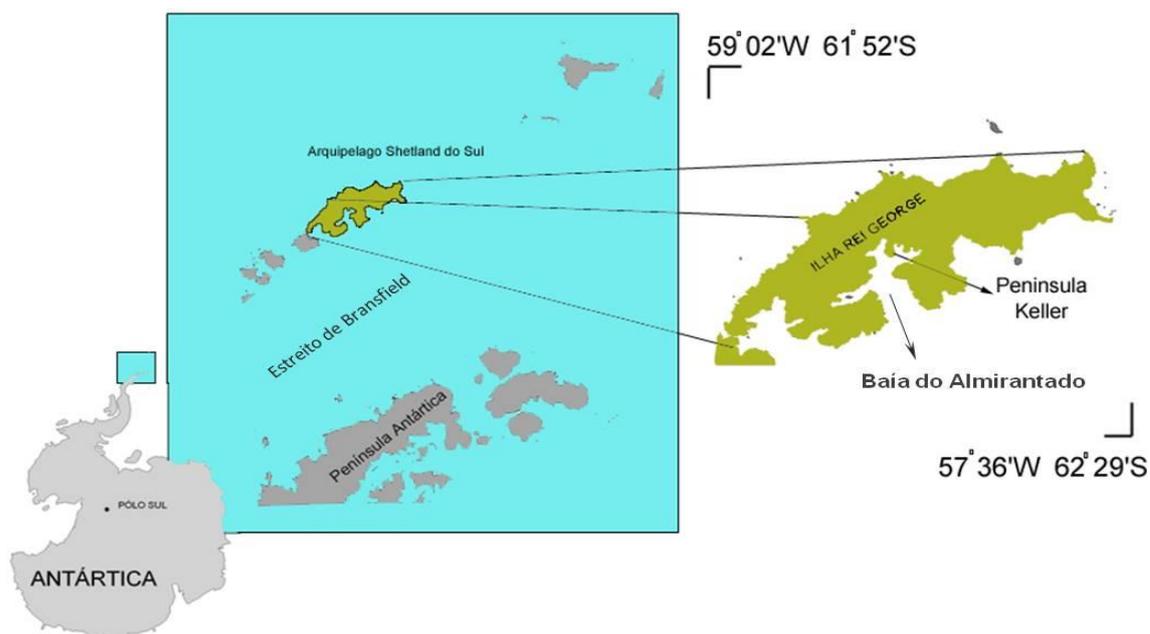


Figura 1.3 - Localização da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica.

1.2.2 Clima

A ilha Rei George possui clima marítimo, caracterizado pela sucessão frequente dos centros de baixa pressão, que favorecem as atividades dos ciclones. Durante os meses de verão, a temperatura do ar alcança valores acima de 0°C e a alta pressão atmosférica na região da península Antártica é comumente associada com temperatura do ar mais baixa na ilha Rei George (BRAUN, 2001). Diferente da condição desértica polar da zona continental, a ilha Rei George apresenta situação característica de semi-aridez da Antártica Marítima, com precipitação anual em torno de 366 mm (SETZER et al., 2004).

A estação meteorológica (427272 W e 3115514 S) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada próxima a EACF, registrou dados meteorológicos no período de janeiro de 1986 a fevereiro de 2011, ou seja, obteve uma longa série de dados de um período de 25 anos. Segundo os dados do INPE (2012), a temperatura do ar média em Keller é de cerca de $-1,8^{\circ}\text{C}$, com desvio padrão de $3,5^{\circ}\text{C}$. O mês mais quente é janeiro, com temperatura do ar média de $2,2^{\circ}\text{C}$, e o mais frio é julho, com média de $-6,4^{\circ}\text{C}$. A temperatura do ar

mínima absoluta já registrada no local foi de $-28,5^{\circ}\text{C}$ em agosto de 1991, e a máxima absoluta foi de $14,9^{\circ}\text{C}$ em janeiro de 1999.

A umidade relativa do ar está frequentemente acima de 80%, com média anual de 85,2%. A velocidade média do vento é de 6m/s (21,6km/h), com desvio de 1,2m/s. O mês com maior velocidade do vento é outubro, com média de 6,7 m/s, enquanto o mês com menores velocidades é janeiro, com média de 5,2m/s (INPE, 2012). Contudo, ocorrem na região rajadas com velocidades superiores a 150km/h (SETZER et al., 2004). A maior rajada já registrada foi em outubro de 2010, com vento de 178km/h. A pressão atmosférica média é de 992 hPa (desvio de 5 hPa). O mês que apresenta maior pressão é maio, com média de 995 hPa, e o de menor pressão é novembro, com 987 hPa. A insolação mínima (no Solstício inverno do Hemisfério Sul) é de 5h 07min, enquanto a insolação máxima (Solstício verão Hemisfério Sul) é de 19h 48min (INPE, 2012).

1.2.3 Relevo

O relevo em Keller é bastante acidentado, com elevações que variam de 0 a 332,8 m (pico Bikenmajer) em curtas distâncias, sendo a altitude média de 96,5 m, com desvio padrão de 80 m (Figura 1.4). A declividade do terreno varia de plano (0 a 3% de declividade) a escarpado (maior que 75%), sendo classificada predominantemente como forte ondulada (35,6% da área total), seguida pelas classes montanhosa (22,3%), ondulada (20%) e escarpada (12,8%). A declividade média é 40,7%, com um desvio padrão de 34,3%. As vertentes em Keller são orientadas principalmente para face oeste (21,3%) e leste (15,3%) (MENDES-JUNIOR et al., 2012).

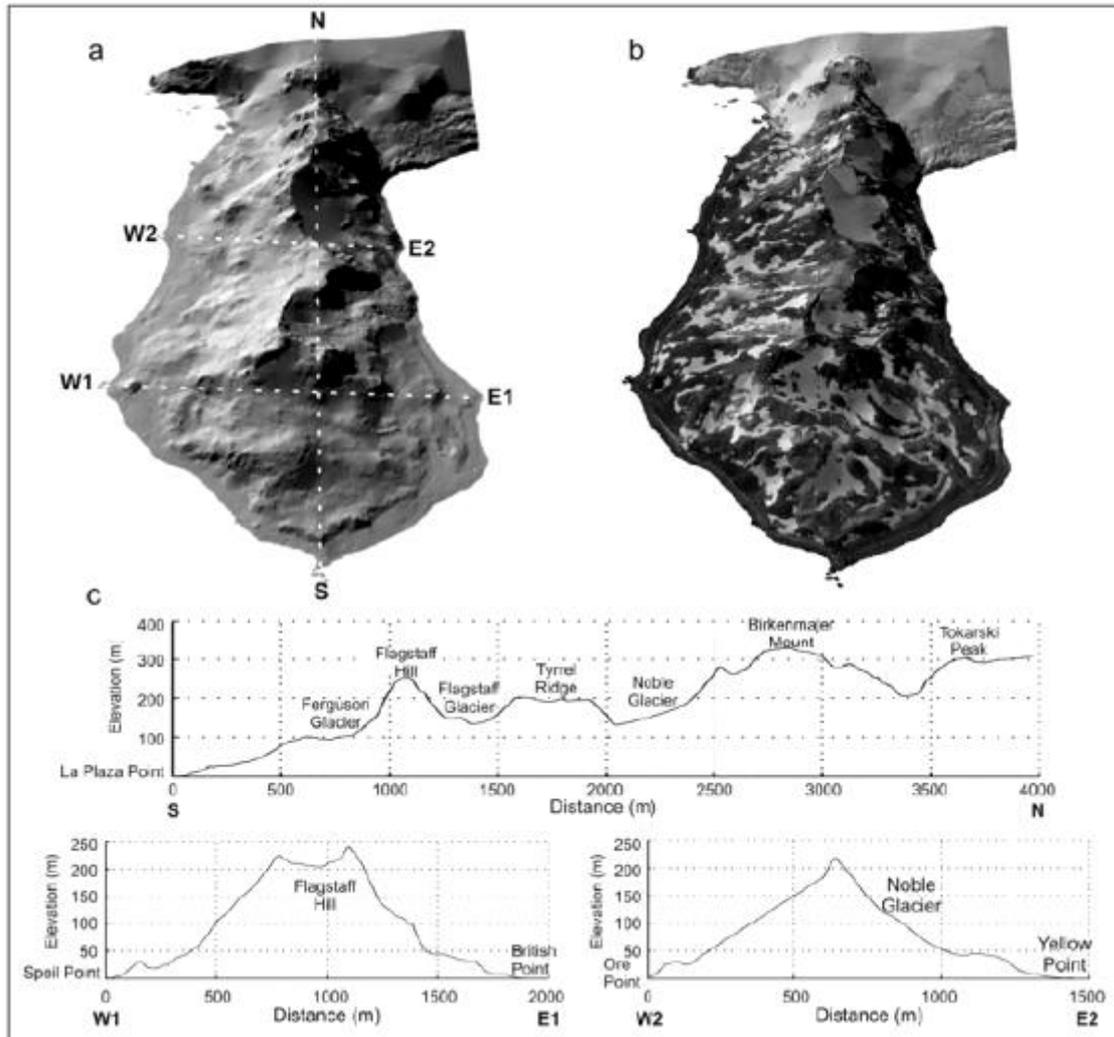


Figura 1.4 - Modelo digital de elevação (a), áreas livre de gelo (b) e perfil topográfico (c) da península Keller (MENDES-JÚNIOR et al., 2012).

1.2.4 Geologia e geomorfologia

Na península Keller, os eventos vulcânicos são distinguíveis por uma sucessão de rochas, que variam de basaltos, andesitos, tufos e conglomerados. O conjunto é atravessado por diques e intrudido por corpos plutônicos com mineralização sulfetada, que afetam os *backgrounds* geoquímicos locais. A ampla redistribuição de sedimentos glaciais Quaternários de tálus e rampas de deposição (*scree slopes*) alterou profundamente a distribuição geoquímica, e descaracterizou os efeitos locais (BIRKENMAJER, 2001; SCHAEFER et al., 2003).

De forma geral, as geoformas dominantes na península são de natureza deposicionais, como o *scree slope*, presente em quase 22% da área total. Os tálus representam quase 9% das geoformas. As morainas (8%) apresentam diferentes formas e não são derivadas somente de uma erosão glacial curta das partes mais altas da península, mas provavelmente tiveram a influência de eventos passados. Keller apresenta paisagem mais estável ao sul e ao leste e mais dinâmica ao oeste e ao norte (FRANCELINO et al., 2003a).

As fortes rajadas de vento que ocorrem na região são um importante agente de transporte de material intemperizado, e o vento, em geral, ajuda a moldar a geoforma final das áreas livres de gelo (FRANCELINO, 2004).

1.2.5 Solos

A formação de solos na Antártica se restringe às áreas livres de gelo, como é o caso de Keller. Os solos antárticos, em geral, são pouco intemperizados, sendo o fator determinante de sua formação o processo de congelamento e descongelamento (intemperismo físico). A precipitação de chuva e a intensa atividade biológica na Antártica Marítima contribuem para a maior intensidade do intemperismo químico nessa região quanto comparado com a Antártica Continental (SIMAS et al., 2008).

Os solos exibem características químicas fortemente relacionadas ao material de origem. Solos derivados de rochas e sedimentos basálticos e andesíticos apresentam reação alcalina e teores elevados de cálcio e magnésio. Já os solos derivados de rochas afetadas por sulfetos apresentam-se fortemente ácidos, com baixos teores de cálcio e magnésio e altos teores de alumínio (SIMAS et al., 2006).

Outro fator que contribuem para a formação dos solos nessa região é a ação do vento. Em Keller, os solos do platô Tyrrel só não são mais profundos em consequência da constante retirada de material da superfície pelo vento, formando, por vezes, verdadeiros pavimentos desérticos (FRANCELINO, 2004).

Apenas 49,5% da superfície de Keller é suficientemente estável para permitir maior desenvolvimento do solo. Assim, os solos em Keller são geralmente rasos, muitas vezes apresentam contato lítico ou paralítico dentro do primeiro metro de profundidade (FRANCELINO et al., 2011). Outra característica comum é o conteúdo elevado de cascalho (*skeletal*).

Ainda segundo Francelino et al. (2011), Cryosols e Leptosols são os grupos de solos mais comuns de Keller, mas Cambisols, Regosols e Fluvisols também estão presentes. A distribuição destes grupos na paisagem é determinada principalmente pela presença ou ausência de permafrost, que define o horizonte criogênico característico do grupo Cryosol. Os solos foram classificados por Francelino et al. (2011) de acordo com a base mundial de referência para classificação de solos (*World Reference Base - WRB*) proposta pela *International Union of Soil Sciences* (IUSS, 2006).

Os criossolos de Keller estão classificados como Turbic Cryosols (FRANCELINO et al., 2011). Estes solos apresentam o horizonte criogênico a partir de 200 cm de profundidade (IUSS, 2006). Formam complexos com Cambisols e Leptosols ao longo de encostas e morainas. Nas áreas mais altas da península, Turbic Cryosols estão mais presentes, sendo que Cambisols e Leptosols ocorrem nos locais onde o permafrost é ausente (FRANCELINO et al., 2011).

1.2.6 Vegetação

A cobertura vegetal da península Keller ocorre de maneira contínua em menos de 3% da sua área total (FRANCELINO et al., 2011). É composta predominantemente por microfítica e criptogâmica, com cianobactérias, briófitas, raras hepáticas, líquens, além de duas espécies de plantas superiores: *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. e *Deschampsia Antarctica* Desv. (FRANCELINO et al., 2003b; PEREIRA et al., 2007).

Segundo Francelino et al. (2003b), em Keller ocorre estreita relação entre a vegetação e a geoforma. Nas rampas de deposição se encontra a maior parte da cobertura vegetal (24,1%). As plantas superiores ocorrem predominantemente nos terraços marinhos

soerguidos. *Usnea* spp (líquen) ocorre em áreas mais estáveis e com boa drenagem, enquanto as briófitas ocorrem em áreas com acúmulo de água líquida. Nas áreas planas litorâneas ocorrem *Deschampsia*, associadas ou não a briófitas e líquens.

A vegetação é aproveitada por animais para nidificação, o que favorece a adição de fósforo e nitrogênio, e dessa forma aumenta a atividade biológica e muda o microclima do solo devido à entrada de carbono orgânico no sistema. Essas áreas são menos propensas aos mecanismos de congelamento-descongelamento devido à presença do carbono, que alteram o albedo da superfície do solo (FRANCELINO et al., 2003b).

1.3 SÍTIOS DE MONITORAMENTO

1.3.1 Localização dos sítios

Os sítios de monitoramento da camada ativa na península Keller foram instalados em locais distintos quanto às características de solos, altitude e cobertura vegetal (Tabela 1.2). Nesse estudo foram utilizados dados de seis sítios, nomeados de acordo com sua proximidade em relação a localidades (pontos de referência) reconhecidos na península, visando facilitar a sua identificação. São eles: Cruzes, VLF (Very Low Frequency), Ponta Yellow, Platô Tyrrel, Ipanema e Refúgio II (Figura 1.5).

Tabela 1.2 - Características gerais dos sítios de monitoramento da camada ativa em Keller

Sítio	Localização (W/S)	Alt. (m)	Características gerais*
Cruzes	427137 3115583	28	Cryosols paralithic**. Localizado atrás da EACF, pavimento pedregoso anguloso de rochas vulcânicas diversas, com veios de quartzo leitoso; cobertura microfítica de briófitas e líquens (<i>Usnea</i>), com <i>Deschampsia antarctica/Colobanthus quitensis</i> em pequenos tufo isolados; boa drenagem.
VLF	427053 3115790	49	Cryosols lithic. Cobertura de fragmentos angulosos de basalto, andesito basáltico e material ácido, com material fino (argilo-siltoso) encrostado e rachado na superfície do terreno; raras <i>Deschampsia</i> ou <i>Colobanthus</i> , mas comuns briófitas/líquens e <i>Usnea</i> .
Yellow	426004 3116940	31	Cryosol lithic. Perfil descrito em área de antigo ninhal de gaiotão, no primeiro nível acima dos terraços marinhos atuais; grande diversidade de briófitas, gramíneas e líquens; drenagem boa.
Tyrrel	426663 3116587	196	Criosol vitric-leptic. Plateau Central da Crista Tyrrel, área mista, com menor influência de basalto andesítico; cobertura pedológica espessa e bem drenada; cobertura biológica praticamente ausente, com raros líquens (<i>Usnea</i> e crustosos escuros).
Ipanema	427084 3116257	89	Leptosol gelic. Área de basalto andesítico; cobertura mista de <i>Usnea</i> , briófitas e <i>Deschampsia</i> ; área de drenagem moderada.
Refúgio	426174 3115459	45	Regosol skeletic-gelic. Área de influência mista, basalto-ácida; manto espesso e bem drenado, com epipedregosidade; colonização acentuada de briófitas, líquens e <i>Deschampsia</i> .

Nota: Alt.= altitude. * Descrição segundo Albuquerque-Filho (2005). ** Classificação de solos de acordo com Francelino (2004).

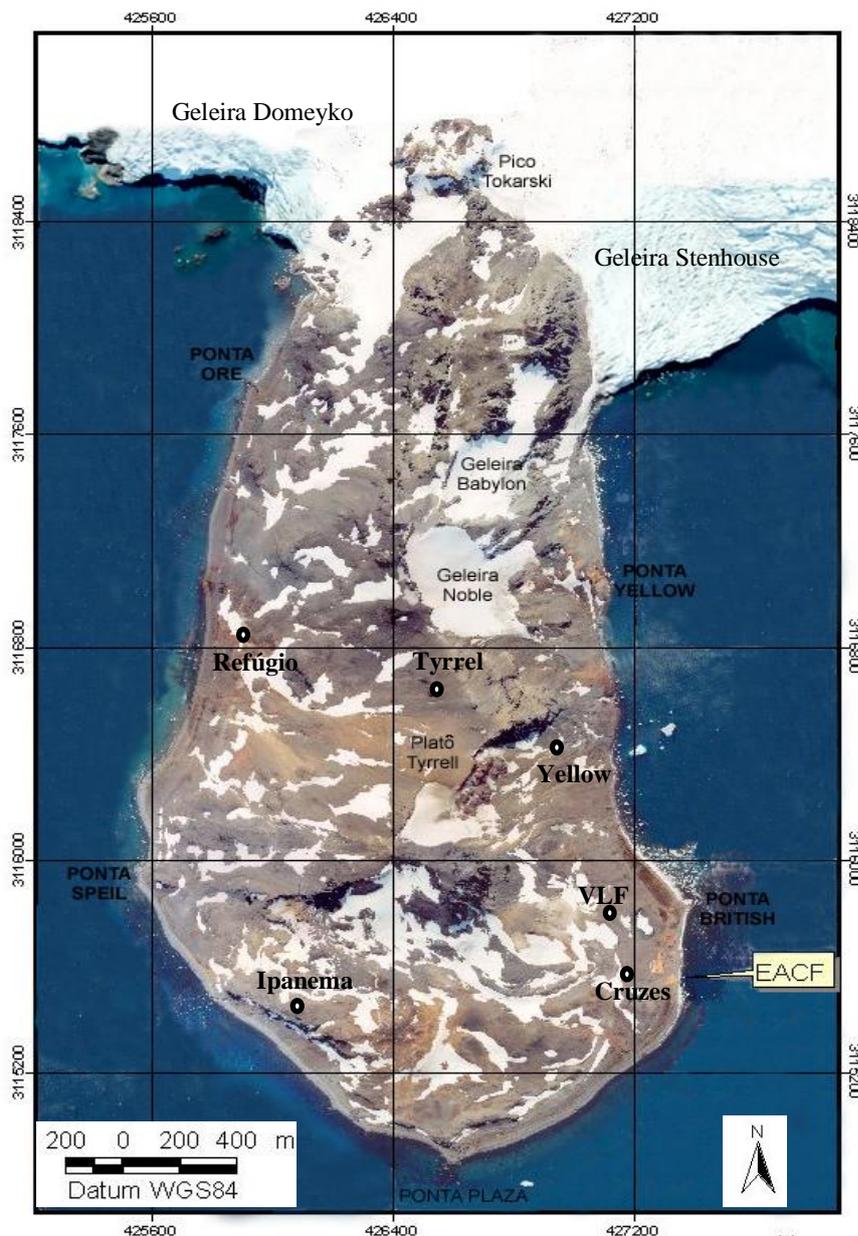


Figura 1.5 - Localização de seis sítios de monitoramento da península Keller: Cruzes, Ipanema, Refúgio, Tyrrel, VLF e Yellow. EACF = Estação Antártica Comandante Ferraz. Adaptado de Francelino (2004).

1.3.2 Caracterização ambiental

A análise textural (Tabela 1.3) e química (Tabela 1.4) dos perfis de solos próximos aos pontos de instalação dos sítios foi realizada por Albuquerque-Filho (2005). Os perfis de solo analisados pelo autor e utilizados como referência para os sítios de monitoramento da camada ativa foram: K1A (Cruzes), K4 (VLF), K14 (Refúgio), K17 (Tyrrel), K18 (Yellow) e K23 (Ipanema). A classificação dos solos foi realizada por Francelino et al. (2011).

Tabela 1.3 - Análise textural próximos aos sítios de monitoramento da camada ativa em Keller (ALBUQUERQUE-FILHO, 2005)

Perfil	Cascalho*	Ag	Af	Silte	Argila	Silte/ Argila	Textura
		%					
K1A (Cruzes) - Cryosol paralithic							
0-10	73	46	9	25	20	1,3	Franco-arenosa
10-20		40	9	29	22	1,3	Franco
20-30		34	12	30	24	1,3	Franco
30-40	58	41	9	28	22	1,3	Franco
40-50		38	10	29	23	1,3	Franco
50-60		36	10	30	24	1,3	Franco
K4 (VLF) - Cryosol lithic							
0-10	18	34	8	35	23	1,5	Franco
10-20		32	14	33	21	1,6	Franco
20-30		28	14	32	26	1,2	Franco
30-40	40	24	11	37	28	1,3	Franco-argilosa
40-50		25	10	37	28	1,3	Franco-argilosa
K14 (Refúgio) - Cryosol lithic							
0-10	42	40	11	27	22	1,2	Franco-argilo-arenosa
10-20		23	10	36	31	1,2	Franco-argilosa
20-30		27	9	34	30	1,1	Franco-argilosa
30-40	55	36	6	33	25	1,3	Franco
40-50		39	4	37	20	1,9	Franco
K17 (Tyrrel) - Cryosol vitric-leptic							
0-10	42	24	3	42	31	1,4	Franco-argilosa
10-20		23	3	43	31	1,4	Franco-argilosa
20-30		29	2	35	34	1,0	Franco-argilosa
30-40	59	19	4	48	29	1,7	Franco-argilosa
40-50		28	2	38	32	1,2	Franco-argilosa
50-60		31	4	30	35	0,9	Franco-argilosa
K18 (Yellow) - Leptosol gelic							
0-10	33	29	8	33	30	1,1	Franco-argilosa
10-20		25	11	37	27	1,4	Franco-argilosa
20-30		27	6	36	31	1,2	Franco-argilosa
30-40	64	30	7	33	30	1,1	Franco-argilosa
40-50		31	6	35	28	1,3	Franco-argilosa
50-60		30	6	35	29	1,2	Franco-argilosa
K23 (Ipanema) - Regosol skeletic-gelic							
0-10	70	52	16	24	8	3,0	Franco-arenosa
10-20		50	15	29	6	4,8	Franco-arenosa
20-30		51	15	27	7	3,9	Franco-arenosa
30-40	16	41	20	31	8	3,9	Franco-arenosa
40-50		37	16	37	10	3,7	Franco-arenosa
50-60		42	11	31	16	1,9	Franco-arenosa

Nota: * A percentagem de cascalho foi calculada apenas para duas amostras por perfil, devido à falta de material para todas as amostras. A classificação dos solos foi feita por Francelino (2004). Ag = areia grossa; Af = areia fina.

Tabela 1.4 - Análise química dos solos da península Keller situados próximos aos sítios de monitoramento da camada ativa (ALBUQUERQUE-FILHO, 2005).

Perfil	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	ISNa	P-rem	COT
		mg/dm ³			cmolc/dm ³						%	mg/dm ³	dag/kg		
K1A* (Cruzes) - Cryosol paralithic															
0-10															
10-20	7,97	283,7	80	152,0	21,24	3,56	0,00	0,0	25,66	25,66	25,66	100,0	2,58	36,8	0,28
20-30	7,89	734,7	84	158,0	22,25	3,06	0,00	0,0	26,21	26,21	26,21	100,0	2,62	38,9	0,25
30-40	8,00	252,6	70	140,0	21,50	2,76	0,00	0,0	25,05	25,05	25,05	100,0	2,43	39,3	0,22
40-50	8,04	227,2	72	150,0	22,62	2,90	0,00	0,0	26,35	26,35	26,35	100,0	2,48	40,1	0,20
50-60	8,13	240,0	84	200,0	22,90	2,97	0,00	0,0	26,95	26,95	26,95	100,0	3,23	41,0	0,22
K4 (VLF) - Cryosol lithic															
0-10	7,39	248,8	122	260,0	10,57	11,53	0,00	1,7	23,54	23,54	25,24	93,3	4,80	29,4	0,33
10-20	7,24	252,6	102	230,0	12,15	10,25	0,00	1,3	23,66	23,66	24,96	94,8	4,23	33,4	0,27
20-30	6,86	267,8	102	240,0	16,06	9,19	0,00	1,0	26,55	26,55	27,55	96,4	3,93	35,9	0,22
30-40	7,34	332,9	91	220,0	20,04	7,94	0,00	0,3	29,17	29,17	29,47	99,0	3,28	38,9	0,22
40-50	7,60	336,6	92	190,0	22,13	6,48	0,00	0,2	29,68	29,68	29,88	99,3	2,78	39,2	0,20
K14 (Refúgio) - Cryosol lithic															
0-10	6,93	261,6	53	108,0	16,38	4,38	0,10	2,0	21,37	21,47	23,37	91,4	2,19	43,1	0,81
10-20	7,05	539,6	54	93,0	25,93	4,85	0,00	1,0	31,32	31,32	32,32	96,9	1,29	43,0	0,42
20-30	7,40	297,7	53	81,0	27,19	2,57	0,00	0,0	30,25	30,25	30,25	100,0	1,16	37,9	0,30
30-40	7,83	42,0	27	52,0	26,31	1,48	0,00	0,0	28,09	28,09	28,09	100,0	0,80	45,6	0,27
40-50	8,06	19,0	24	48,0	25,96	1,30	0,00	0,0	27,53	27,53	27,53	100,0	0,76	45,0	0,26

Tabela 1.4 - Continuação.

Perfil	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+AL	SB	t	T	V	ISNa	P-rem	COT
		mg/dm ³			cmolc/dm ³						%		mg/dm ³	dag/kg	
K17 (Tyrrel) - Cryosol vitric-leptic															
0-10	7,69	313,2	47	140,0	46,84	6,08	0,00	0,8	53,65	53,65	54,45	98,5	1,13	36,2	0,14
10-20	7,61	423,4	38	115,0	63,94	4,71	0,00	1,0	69,25	69,25	70,25	98,6	0,72	38,7	0,15
20-30	7,78	396,5	34	105,0	68,97	3,66	0,00	0,5	73,18	73,18	73,68	99,3	0,62	41,1	0,12
30-40	7,89	254,1	31	82,0	59,31	2,94	0,00	0,7	62,69	62,69	63,39	98,9	0,57	45,9	0,16
40-50	6,20	271,0	51	83,0	56,91	3,00	0,00	2,6	60,40	60,40	63,00	95,9	0,60	42,7	0,13
50-60	7,34	318,4	54	81,0	62,21	3,00	0,00	1,8	65,70	65,70	67,50	97,3	0,54	42,0	0,13
K18 (Yellow) - Leptosol gelic															
0-10	5,75	308,0	125	204,0	18,45	8,56	0,30	4,8	28,22	28,52	33,02	85,5	3,11	37,6	0,87
10-20	6,42	416,5	158	198,0	23,87	9,70	0,00	3,6	34,83	34,83	38,43	90,6	2,47	36,2	0,43
20-30	6,76	393,3	133	168,0	24,28	8,22	0,00	3,3	33,57	33,57	36,87	91,0	2,18	38,6	0,30
30-40	7,11	353,6	153	194,0	28,13	6,56	0,00	2,0	35,92	35,92	37,92	94,7	2,35	40,7	0,19
40-50	7,28	323,8	144	180,0	29,31	4,93	0,00	1,5	35,39	35,39	36,89	95,9	2,21	38,1	0,24
50-60	7,26	337,5	106	131,0	25,71	3,51	0,00	11,1	30,06	30,06	41,16	73,0	1,89	43,1	0,21
K23 (Ipanema) - Regosol skeletic-gelic															
0-10	5,30	72,0	83	124,0	18,22	2,58	2,60	12,5	21,55	24,15	34,05	63,3	2,23	18,3	3,64
10-20	5,43	88,9	92	130,0	8,58	5,29	3,20	11,7	14,68	17,88	26,38	55,6	3,16	7,4	2,17
20-30	5,37	90,9	86	122,0	9,43	5,88	2,00	9,6	16,06	18,06	25,66	62,6	2,94	201,3	2,07
30-40	5,57	69,2	93	150,0	10,81	6,69	1,20	8,1	18,39	19,59	26,49	69,4	3,33	9,3	1,19
40-50	6,18	240,8	94	139,0	12,78	7,17	0,00	3,1	20,79	20,79	23,89	87,0	2,91	21,1	0,67
50-60	6,34	396,5	83	105,0	18,17	8,88	0,00	2,1	27,72	27,72	29,82	93,0	1,65	28,9	0,25

Nota: * Não foi analisada pela falta de material, em função da pedregosidade das amostras na profundidade 0-10 cm, gerando pouca terra fina seca ao ar (TFSA). A classificação dos solos foi feita por Francelino (2004). SB = soma de bases trocáveis; t = Ca+Mg+Al; T = Ca+Mg+(H+Al); V = saturação de bases = (SB/T)*100; ISNa = índice de saturação por sódio; Prem = P remanescente; COT = carbono orgânico total.

1.3.3 Instalação dos sensores

O sistema de monitoramento da camada ativa foi instalado entre os meses de fevereiro e março de 2008. Para cada sítio foram instalados sensores de temperatura do solo, (com precisão de $\pm 0,42^{\circ}\text{C}$ - modelo 107 Temperature Probe, Campbell Scientific Inc.), em diferentes profundidades ao longo do perfil de solo, considerando a distinção entre horizontes e/ou camadas (Figura 1.6). Foram utilizados três sensores em Cruzes, VLF, Yellow e Ipanema, e quatro sensores em Tyrrel e Refúgio.

Em quatro sítios (Yellow, Ipanema, Tyrrel e Refúgio) foi instalado também um sensor de umidade do solo (precisão de $\pm 2,5\%$ VWC - modelo CS616-L, Campbell Scientific Inc.) no último horizonte/camada do solo. Considerou-se a calibração de fábrica do sensor com condutividade elétrica aparente de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ e densidade menor que $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, na faixa de medição de 0% a 50% VWC.

Os sensores foram acoplados a um dispositivo de aquisição e armazenamento automático de dados (*data logger*) de diferentes modelos (CR10, CR21X e CR1000, Campbell Scientific Inc.), alimentado por bateria blindada de 92 amperes de alta resistência, que foi programado para registrar os dados de temperatura e umidade do solo a cada hora. Os dados foram registrados na memória do dispositivo, de acordo com o dia Juliano e a hora UTC (Tempo Universal Coordenado) (que para hora local, deve-se subtrair 4 horas).

Em cada local de instalação do sistema foi fincada uma estaca de madeira de 2 m de altura, cujas coordenadas foram levantadas com receptor GPS geodésico (modelo GX1220, LEICA). A altitude dos sítios foi mensurada com o mesmo GPS. A estaca serviu para auxiliar na visualização dos sítios no campo.

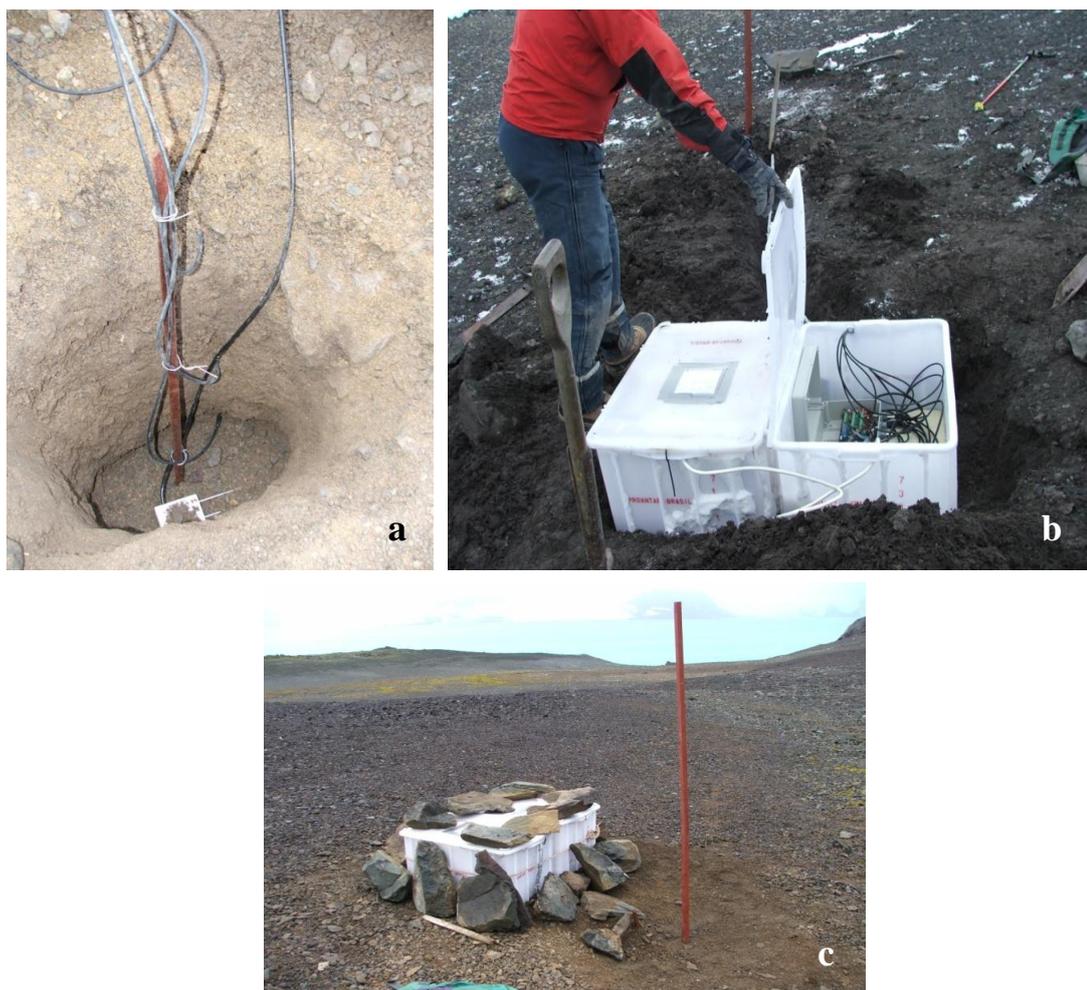


Figura 1.6 - Metodologia utilizada na instalação dos sítios de monitoramento: a) sensores instalados em diferentes profundidades; b) caixa com o *data logger* (a caixa fechada está com a bateria do sistema); c) estaca vermelha para visualização do sítio no campo (pedras servem para proteger a tampa das caixa contra o vento).

1.3.4 Coleta de dados

Foram obtidos dados de temperatura e umidade do solo nos seis sítios de monitoramento da camada ativa, referente ao período de fevereiro/março de 2008 a janeiro/fevereiro de 2011, o que totalizou três anos de monitoramento.

A coleta de dados foi realizada através da conexão da memória de cada dispositivo *data logger* a um microcomputador, utilizando o programa PC200w 4.1 (Campbell Scientific Inc.). Essas memórias foram descarregadas anualmente, durante as Operações Antárticas (OPERANTAR) ocorridas nos verões, quando também era realizada a manutenção dos sistemas. Essa manutenção consistia em retirar as baterias dos dispositivos e trocá-las por outras recarregadas, a fim de que o sistema tivesse energia suficiente para funcionar ao longo do ano.

Durante o período de manutenção do sistema, não ocorria o registro dos dados, o que ocasionou perda de dados em alguns dias. Porém, devido ao longo tempo de coleta, o que proporcionou a obtenção de grande quantidade de dados, essa perda não prejudicou as análises estatísticas (que serão abordadas nos próximos capítulos).

1.4 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE-FIHO, M. R. Geoquímica de solos da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica, como subsídio ao monitoramento ambiental. 129p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2005.

ANDRÉ, M. F. From climatic to global change geomorphology: contemporary shifts in periglacial geomorphology. In: KNIGHT, J. & HARRISSON, S. (ed.). Periglacial and paraglacial processes and environments. London: The Geological Society, 2009. 267p.

ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E. Detecção de mudanças ambientais na Antártica através de técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Pesquisas em Geociências, v. 28, n. 2, p. 337–342, 2001.

BIRKENMAJER, K. Mesozoic and cenozoic stratigraphic units in parts of the south shetlands islands and northern antarctic península. Studia Geologica Polonica, v. 188, 188p. 2001.

BOCKHEIM, J. G.; HALL, K. J. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. South African Journal of Science, v. 98, p. 82-90, 2002.

BÖLTER, M.; BEYER, L. Maritime and continental Antarctica: the sites of investigation in context. In: BEYER, L. & BÖLTER, M. (eds.). Geocology of Antarctic Ice-free coastal landscapes. Berlin: Springer, 2002. 427p.

BRAUN, M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica). Doctoral Thesis. Freiburg. Freiburg: Albert–Ludwigs–Universität, 2001. 165p.

CAMPBELL E CLARIDGE Antarctica: soils, weathering processes and environment. New York: Elsevier Science, v. 16, 1987. 368p.

CAMPBELL, I.B. & CLARIDGE, G.G.C. Landscape evolution in Antarctica. Earth-Science Reviews, 25(5-6), p.345-353, 1988.

CHAMBERS, M.J.G. Investigations on patterned ground at Signy Island, South Orkney Islands: III. Miniature patterns, frost heaving and general conclusions. British Antarctic Survey Bulletin, No. 12, 1–22, 1967.

CONVEY, P. Antarctic Terrestrial Ecosystems: Responses to Environmental Change. Polarforschung, v. 75, 101–111, 2006.

FRANCELINO, M.R. Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da Antártica Marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal da Península Keller. 102p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2004.

FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, E.G.R.; FERNANDES-FILHO, E.I.; ALBUQUERQUE-FILHO, M.R.; SIMAS, F.N.B.; MOREIRA, G.F. Geoformas da península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental. In: SCHAEFER, E.G.R. (ed.) Ecossistemas

terrestres e solos da antártica marítima – Baía do Almirantado, Ilha Rei George. Viçosa: NEPUT, 2003a. 119p.

FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, E.G.R.; FERNANDES-FILHO, E.I.; SIMAS, F.N.B.; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, A.C.; MIRANDA, V.J. Coberturas vegetais da península Keller: distribuição e relações com a geoforma e solos. In: SCHAEFER, E.G.R. (ed.) Ecossistemas terrestres e solos da antártica marítima – Baía do Almirantado, Ilha Rei George. Viçosa: NEPUT, 2003b. 119p.

FRANCELINO, M. R., SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B., FILHO, E. I. F., DE SOUZA, J. J. L. L., & DA COSTA, L. M. Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Catena*, 85(3), 194–204, 2011.

FRENCH, H.M., 1996. *The Periglacial Environment*, 2nd Ed. Longman, Harlow, England. 341 p.

GUGLIELMIN, M. Geomorphology advances in permafrost and periglacial research in Antarctica: A review. *Geomorphology*, 155-156, p. 1–6, 2012.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto de Meteorologia Antártica. Disponível em: <http://antartica.cptec.inpe.br/>. Acesso: 21/02/2012.

IUSS – International Union of Soil Sciences. World Reference Base (WRB) for Soil Resources 2006. Rome: FAO, 2006. 127p.

KEJNA, M. Trends of air temperature of the Antarctic during the period 1958 – 2000. *Polish Polar Research*, v. 24, n.2, 99–126, 2003.

MENDES-JÚNIOR, C.W.; DANI, N.; ARIGONY-NETO, J. et al. Terrain analysis of the Keller Peninsula (King George Island, Antarctica) by GIS techniques. *Pesquisa Antártica Brasileira*, v. 5, 115–127, 2012.

PEREIRA, A.B.; SPIELMANN, A.A.; Martins, M.F.N.; FRANCELINO, M.R. Plant communities from ice-free areas of Keller Peninsula, King George, Antarctica. *Oecol. Bras.*, 11(1), p. 14–22, 2007.

RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. King George Island – South Shetland Islands, Maritime Antarctic. In: BEYER, L. & BÖLTER, M. (eds.). *Geoecology of Antarctic Ice-free coastal landscapes*. Berlin: Springer, 2002. 427p.

SCALA-JUNIOR, N. et al. Spatial and temporal variability in soil CO₂ e C emissions and relation to soil temperature at King George Island, Maritime Antarctica. *Polar Science*, v. 4, p. 479-487, 2010.

SCHAEFER, E.G.R.; FRANCELINO, M.R.; SIMAS, F.N.B.; COSTA, L.M. Geologia e geotectônica. In: SCHAEFER, E.G.R. (ed.) *Ecossistemas terrestres e solos da antártica marítima – Baía do Almirantado, Ilha Rei George*. Viçosa: NEPUT, 2003. 119p.

SETZER et al. 2004. Regime climático na baía do almirantado: relações com o ecossistema terrestre. In: SCHAEFER, E.G.R. (ed.) Ecossistemas terrestres e solos da antártica marítima – Baía do Almirantado, Ilha Rei George. Viçosa: NEPUT, 2004. 192p.

SIMAS, F.N.B., SCHAEFER, C.E.G.R., ALBUQUERQUE-FILHO, M.R. et al. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, Maritime Antarctica. *Geoderma*, v. 144, 116–122, 2008.

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

SIMÕES, J.C. O ambiente antártico: domínio de extremos. In: GOLDEMBERG, J. (coord.) Antártica e as mudanças globais: um desafio para a humanidade. Série Sustentabilidade, vol. 9. São Paulo: Blucher, 2011. 166p.

VIEIRA, G.; BOCKHEIM, J.; GUGLIELMIN, M. et al. Thermal State of Permafrost and Active-layer Monitoring in the Antarctic: Advances During the International Polar Year 2007 – 2009. *Permafrost and Periglacial Process*, v. 21, p. 182–197, 2010.

WAGNER, D. & LIEBNER, S. Global Warming and Carbon Dynamics in Permafrost Soils: Methane Production and Oxidation. In: MARGESIN, R. (ed.). *Permafrost soils*. Berlin: Springer, 2009. 348p.

WEATHER UNDERGROUND, Inc. Permafrost. Disponível em: <<http://classic.wunderground.com/climate/permafrost.asp>>. Acesso em: 03/02/2013.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS DE TEMPERATURA DO SOLO EM SEIS SÍTIOS DE MONITORAMENTO DA PENÍNSULA KELLER

RESUMO

Esse capítulo teve como objetivo realizar uma análise exploratória dos dados de temperatura do solo, obtidos nos sítios de monitoramento da camada ativa instalados na península Keller. Foi realizada uma análise de agrupamento para identificar os sítios com variabilidade mensal homogênea quanto à temperatura a 10 cm de profundidade (comum para todos os sítios). A média anual da temperatura do solo e as temperaturas máximas e mínimas mensais foram utilizadas na análise de regressão linear para estimar a espessura da camada ativa e, conseqüentemente, a profundidade da superfície do permafrost. Observou-se variabilidade homogênea da temperatura nos sítios de VLF, Yellow e Refúgio, compondo o definido como grupo 1, assim como entre os sítios de Tyrrel e Ipanema (grupo 2). Cruzes apresentou temperatura do solo com padrões de variabilidade diferentes dos demais sítios, sendo mais elevada. Nesse sítio, o permafrost encontra-se a mais de 2m de profundidade no solo, enquanto no primeiro grupo ele se localiza entre 1 e 2m e no segundo até 1m de profundidade. A temperatura do solo nos diferentes sítios de Keller, assim como em outros ambientes periglaciais, é definida principalmente pela presença do permafrost.

2.1 INTRODUÇÃO

Técnicas modernas desenvolvidas para obtenção e armazenamento automático de dados, empregadas nos sítios de monitoramento da camada ativa dos solos da Antártica, produziram grande quantidade de dados, que contribuem para o entendimento dos processos relacionados à temperatura do solo na região (VIEIRA et al., 2010). A análise exploratória visa extrair as informações mais importantes a partir desses dados, além de orientar na aplicação de análises mais complexas e avançadas para o aprofundamento da pesquisa, dando suporte para conclusões mais confiáveis (LANDIM, 2011).

A temperatura do solo depende de vários fatores, como: atmosféricos (i.e. temperatura do ar, precipitação e radiação solar); condições da superfície do solo (i.e. cobertura de neve e de vegetação) e propriedades do solo (i.e. estrutura, composição química e umidade). Entretanto, em ambientes periglaciais a presença de permafrost é o fator essencial para definição do regime térmico do solo (FRENCH, 1996; GRUBER & HAEBERLI, 2009). Na Antártica, a temperatura do solo, por estar relacionada a vários atributos ambientais, sendo assim um eficiente indicador do efeito das mudanças climáticas na região (BEYER et al., 1999).

Segundo Gruber e Haeberli (2009) o permafrost é invisível, porque é um fenômeno térmico. É difícil determinar sua distribuição no solo, uma vez que geralmente se encontra abaixo da camada ativa. Além disso, sua detecção confiável requer medições de temperatura em um período, no mínimo, de dois anos para compreender a evolução sazonal da temperatura.

A camada ativa está sujeita a ciclos de congelamento e descongelamento anuais. Em ambientes periglaciais, os solos derretem na primavera e verão, congelam no outono e permanecem congelados durante o inverno. No regime térmico de solos sobre efeito do permafrost, existem quatro períodos típicos denominados (FRENCH, 1996):

- Camada ativa: período em que a temperatura da superfície do solo se mantém acima 0°C, quando a área fica livre de gelo no verão;
- Cortina zero: começa o resfriamento pela deposição de neve na superfície, porém a temperatura do solo oscila em torno de 0°C (condição isotérmica), devido ao calor latente absorvido no período quente;
- Solo congelado: no inverno, quando há espessa cobertura de neve na superfície, a temperatura do solo diminui drasticamente, mantendo-se sempre abaixo de 0°C;
- Derretimento de neve: quando a neve da superfície começa a derreter com a chegada da primavera, o que ocasiona rápido aumento da temperatura na superfície do solo, devido à entrada de água no solo.

O comprimento de cada um desses períodos dependerá das condições ambientais locais. Mesmo com a ocorrência da deposição de neve no período de cortina zero, essa neve do outono (início da estação fria) é pouco densa, por isso não é um bom isolante térmico para o solo. A neve do inverno é mais densa e promove maior isolamento, por isso a temperatura nesse período é significativamente inferior a do outono, mesmo quando a espessura da cobertura de neve é semelhante nos dois períodos (GRUNDSTEIN et al. 2005).

Enquanto o clima influencia a temperatura do solo numa escala global, localmente a temperatura do solo é influenciada principalmente pela topografia e propriedades do solo (GRUBER & HAEBERLI, 2009). Em ambientes periglaciais, a altitude é inversamente proporcional à espessura da camada ativa. Assim, num gradiente altitudinal, o permafrost tende a estar mais próximo da superfície do solo nas regiões de maior altitude (GRUBER & HAEBERLI, 2009).

Outro fator determinante na temperatura do solo é a cobertura vegetal. Na Antártica, a cobertura vegetal protege o solo das variações térmicas, com efeito isolante ou tampão (KEJNA & LASKA; 1999; CANNONE et al., 2006; GUGLIELMIN et al., 2008; CANNONE & GUGLIELMIN, 2009). Isso ocorre porque os processos de troca de energia entre o solo e o ar são mais diretos e efetivos em superfícies marcadas pela ausência de vegetação (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2007). A intensidade do isolamento térmico da vegetação irá depender da estrutura, densidade e espessura dessa cobertura no solo (KEJNA & LASKA; 1999; CANNONE et al., 2006; CANNONE & GUGLIELMIN, 2009).

O objetivo desse capítulo foi comparar os diferentes sítios de monitoramento da camada ativa na península Keller, através de uma análise exploratória dos dados obtidos nos sítios entre os anos de 2008 e 2011. Buscou-se discutir as possíveis relações entre a temperatura do solo e outros fatores ambientais locais, como altitude, tipo de solo e presença de cobertura vegetal.

2.2 ANÁLISE DE DADOS

Foram calculadas as médias diárias da temperatura do solo nas diferentes profundidades de cada sítio de Keller. Posteriormente, realizou-se a análise de agrupamento, utilizando-se o método Ward (variância mínima), tendo como medida de dissimilaridade a distância euclidiana, para identificar os sítios com variabilidade mensal homogênea quanto à temperatura a 10 cm de profundidade. Essa profundidade foi escolhida devido a mesma ser comum para todos os sítios. A análise multivariada foi feita no programa Past 2.15 (HAMMER et al., 2001).

O método de Ward (WARD, 1963) minimiza a dissimilaridade, ou o total da soma dos quadrados dentro de grupos, também conhecida como soma dos quadrados dos desvios (SQD) para formar os grupos de indivíduos com características homogêneas. A cada passo, são construídos grupos, que resultaram no menor SQD dentro de grupos. Nessas etapas, são

consideradas todas as possíveis formações de todos os pares de grupos e, os dois que resultarem em menor aumento de SQD são agrupados até que todos os grupos formem um único grupo, com todos os indivíduos (EVERITT & DUNN, 1991).

Através da metodologia proposta por Brown (1970, apud BURN & SMITH, 1988), as médias anuais da temperatura em diferentes profundidades do solo, assim como as temperaturas máximas e mínimas mensais, foram calculadas para determinar a espessura da camada ativa e o início da camada de permafrost (Figura 2.1). Como os sensores de Keller não alcançaram o permafrost, através de análise de regressão linear simples foi estimada a espessura da camada ativa e, conseqüentemente, a profundidade da superfície do permafrost em cada sítio.

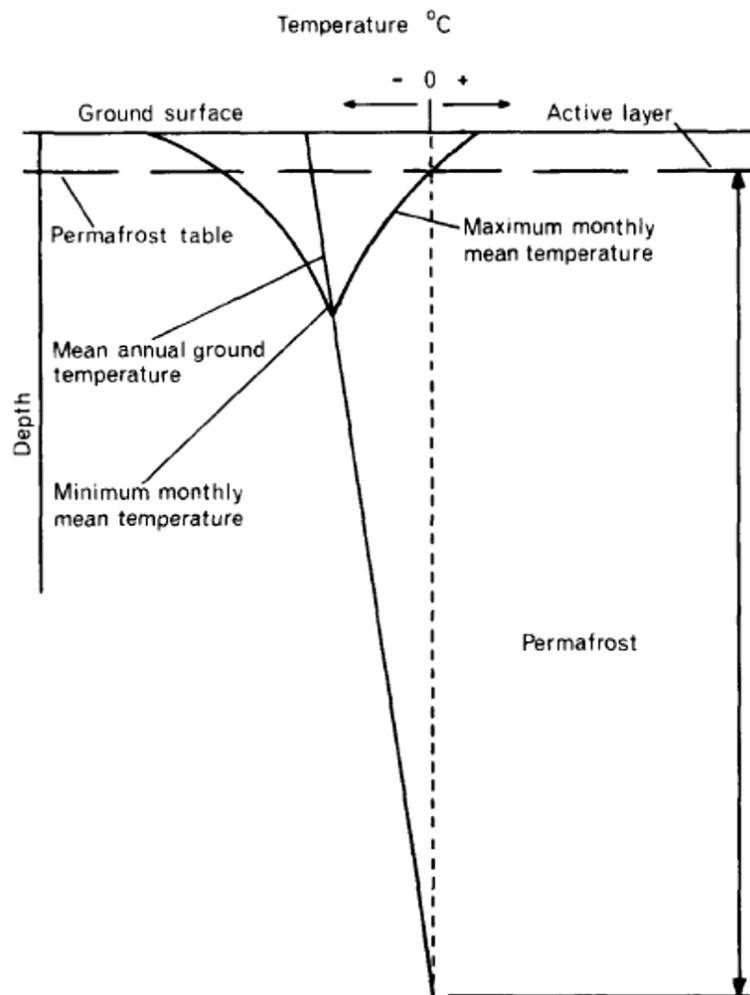


Figura 2.1 - Diagrama do regime térmico do permafrost, proposto por Brown (1970).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de agrupamento (Figura 2.2) permitiu identificar dois grupos com padrões de variação homogênea de temperatura do solo a 0,10 m de profundidade, e um sítio com padrão independente.

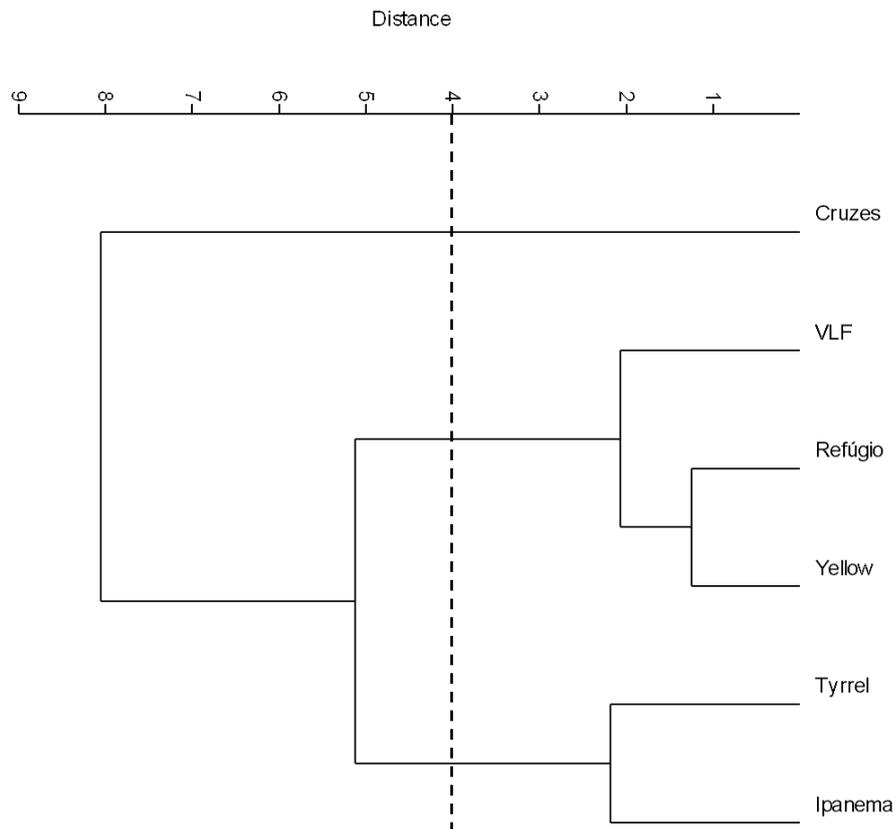


Figura 2.2 - Agrupamento dos sítios de acordo a média mensal de temperatura do solo a 10 cm de profundidade.

Observou-se variabilidade homogênea entre os sítios de VLF, Yellow e Refúgio, compondo o denominado de grupo 1, e entre os sítios de Tyrrel e Ipanema, que formaram o grupo 2. Cruzes apresentou um regime térmico da camada ativa significativamente diferente dos demais sítios.

No grupo 1, a principal característica em comum (apresentadas no capítulo 1) dos três sítios é a altitude. VLF e Refúgio estão em altitudes próximas (49 e 45, respectivamente) e apresentam o mesmo tipo de solo (Crysol lítico). Yellow está numa altitude inferior (31 m) e seu solo (Leptosol gélido) é diferente dos demais sítios do seu grupo. Entretanto, esse sítio apresentou menor distância euclidiana do sítio Refúgio, formando um subgrupo dentro do grupo 1. Uma característica ambiental que difere VLF dos demais sítios do seu grupo é a presença da cobertura vegetal, que nesse local é rara, composta predominantemente de tufo isolados de briófitas e líquens, enquanto no Yellow e Refúgio a vegetação é mais densa e diversificada, com presença inclusive de gramíneas. Contudo, esse sítio teve menor média de temperatura do solo dentro do seu grupo, e a ausência de vegetação implica num aumento da temperatura (KEJNA & LASKA; 1999; CANNONE et al., 2006; CANNONE & GUGLIELMIN, 2009). Portanto, a diferença na altitude de VLF em relação aos demais sítios do seu grupo pode ser o principal fator que difere seu regime térmico.

O grupo 2 é composto pelos sítios Tyrrel e Ipanema. Tyrrel está localizado na maior altitude (196m) em relação a todos os sítios e por isso esperava que esse local tivesse a menor temperatura do solo, onde é mais frio e ocorre maior deposição de neve (GRUBER & HAEBERLI, 2009). No entanto, esse sítio teve a temperatura similar à encontrada em

Ipanema, com 89 m de altitude. Ipanema apresenta cobertura vegetal densa, com presença marcante de gramíneas, que funcionam como isolante térmico (CANNONE et al., 2006; GUGLIELMIN et al., 2008; CANNONE & GUGLIELMIN, 2009), o que pode ter contribuído na variabilidade homogênea da temperatura do solo com o sítio Tyrrel, apesar da diferença altitudinal de 107 metros entre eles.

Nos sítios com maior altitude, a camada de neve formada tende a ser mais espessa (GRUBER & HAEBERLI, 2009) do que nos sítios de menor altitude. Como a neve funciona como isolante térmico (GRUNDSTEIN et al. 2005), durante o inverno, o solo dos sítios de maior altitude transferem menos calor para a atmosfera em relação aos de menores altitudes, e assim, as temperaturas do solo mínima desses sítios é superior aos de menor altitude. No verão, a neve demora mais a derreter nos sítios de maior altitude, e quando derrete disponibilizam um maior volume de umidade para o solo, devido à camada de neve mais espessa. Esses processos contribuem para uma menor transferência de calor para o solo, além da maior umidade que contribui para o aumento do calor específico do solo, que associados resultam em menor aquecimento no verão e, dessa forma, temperaturas do solo máximas inferiores aos solos dos sítios de menor altitude (GRUBER & HAEBERLI, 2009).

Cruzes, com 28m de altitude, não apresentou similaridade com nenhum dos grupos formados e mostrou média de temperatura do solo mais elevada (-0,25 a -0,04° C). Isso pode ter ocorrido devido à influência antrópica no regime térmico desse sítio em função da sua proximidade com Estação Antártica Comandante Ferraz, além do fato desse sítio estar isolado por barreiras naturais, com a escarpa do Morro Flagstaff a oeste e uma grande moraina ao sul. A formação dos solos na Antártica, em função suas características ambientais extremas, ocorreram através de um processo lento. Por isso, a mínima perturbação humana pode acarretar numa resposta significativa nesses ambientais, principalmente nos solos mais jovens localizados nas regiões de menor altitude (BEYER et al., 1999).

A Figura 2.3 apresenta as médias diárias de temperatura do solo em todas as profundidades de cada sítio de monitoramento. De modo geral, observou-se a presença de um padrão cíclico, devido ao efeito da sazonalidade. No outono e inverno, a temperatura do solo em todos os sítios se manteve abaixo de 0°C, enquanto no período de aquecimento (primavera e verão) ocorreu o descongelamento da camada ativa, e as temperaturas do solo ficaram aproximadamente entre 0°C e 6°C, dependendo do sítio. Assim, foi possível identificar os quatro períodos típicos que descrevem o regime térmico do solo em ambientes periglaciais (FRENCH, 1996; HINKEL, 1997; HINKEL et al., 2001): camada ativa (CA), cortina zero (CZ), solo congelado (SC) e derretimento da neve (DN).

Cruzes apresentou um regime térmico da camada ativa semelhante ao de ambientes periglaciais localizados em latitudes menores no Hemisfério Norte (BELTRAMI, 2001; LUETSCHG et al., 2004), com um longo período de cortina zero, com atraso no congelamento do solo em comparação com os demais sítios, o que indicou que nessa área pode haver maior quantidade de calor sensível no solo devido a possível influência antrópica decorrente da sua proximidade com a Estação Comandante Ferraz. O isolamento térmico que ocorre nos sítios do grupo 2 (Tyrrel e Ipanema) ocasionaram numa menor diferença na variação de temperatura entre as diferentes profundidade do solo, quando comparados com os sítios do primeiro grupo.

A Figura 2.4 mostra o regime térmico do solo nos seis sítios de Keller. Todos os sítios apresentaram média da temperatura do solo inferior a 0°C. Cruzes mostrou os maiores valores de temperatura do solo, e em seguida os grupos 1 e 2.

A profundidade da superfície da camada de permafrost estimada para os sítios foi de mais de 2m para Cruzes, de 1 a 2 m para o grupo 1 e até 1 m para o sítios que compõem o grupo 2. Como nenhuma das profundidades estudadas nos sítios alcançou o permafrost, o regime térmico apresentado se restringe à camada ativa (FRENCH, 1996).

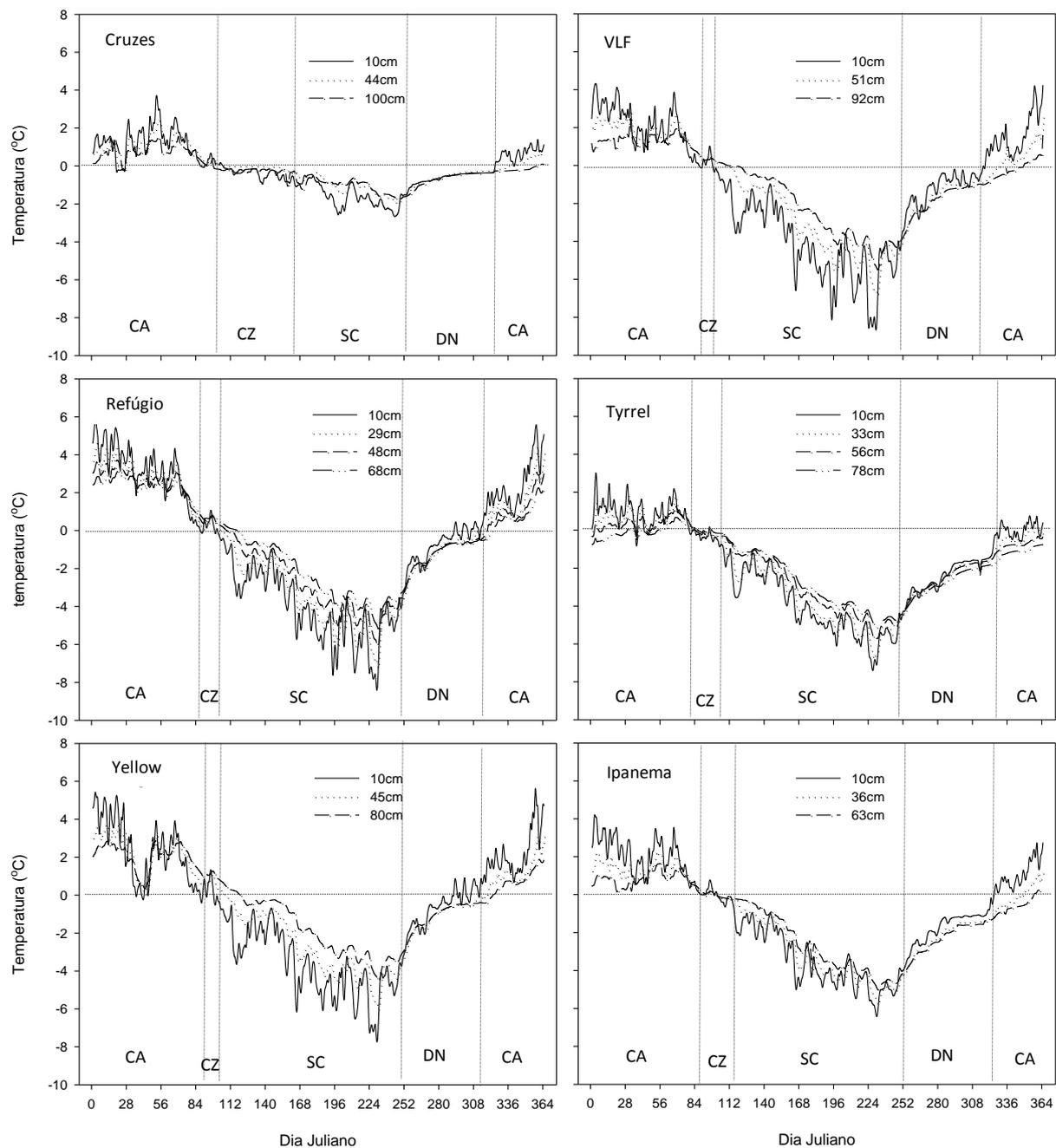


Figura 2.3 - Médias diárias da temperatura do solo (2008 a 2011) em seis sítios de monitoramento em Keller. Os períodos delimitados se referem a: camada ativa (CA), cortina zero (CZ), solo congelado (SC) e derretimento da neve (DN).

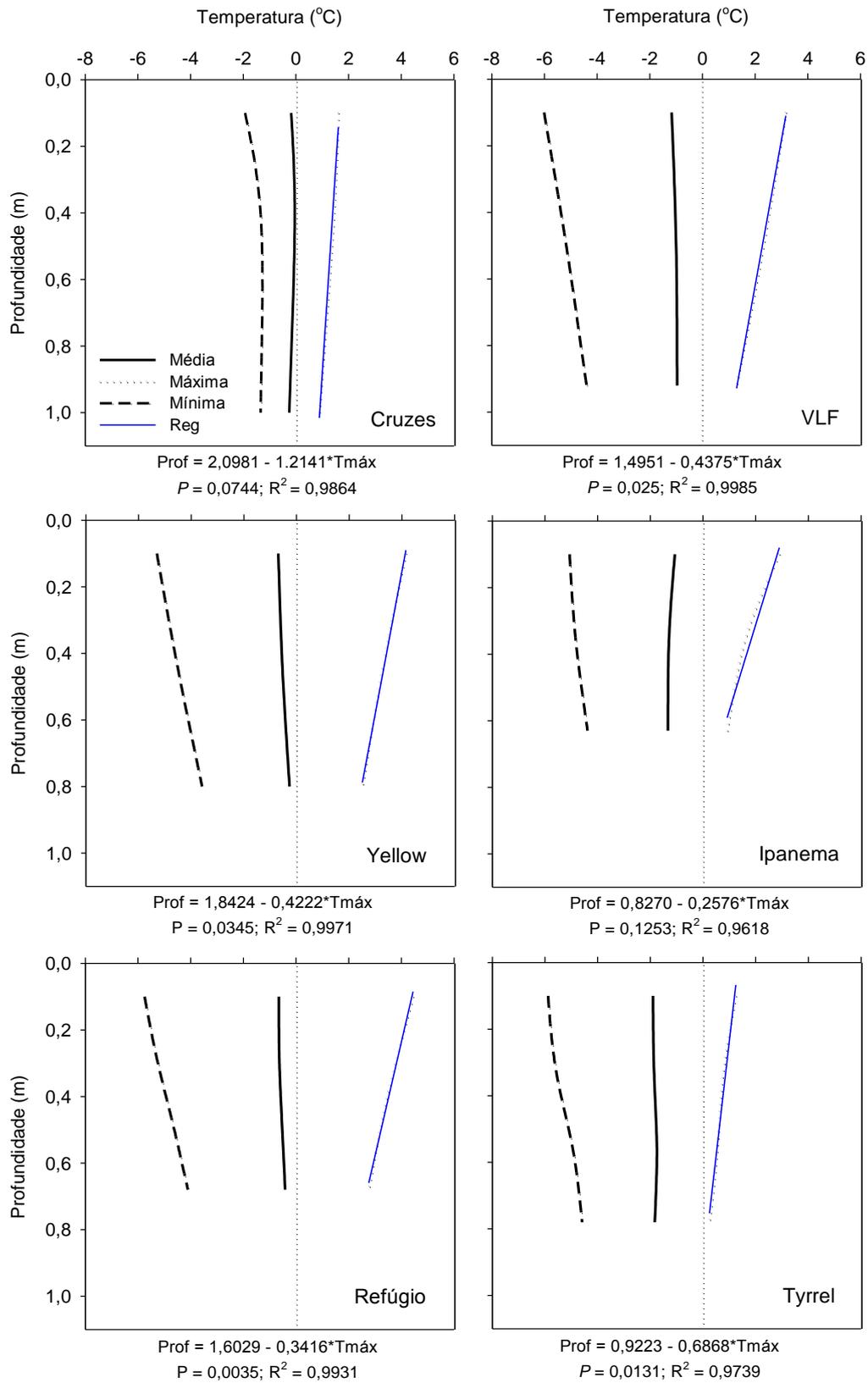


Figura 2.4 - Regime térmico da camada ativa (2008-2011) em seis sítios da península Keller. Reg = tendência da temperatura máxima (regressão linear).

2.4 CONCLUSÕES

A análise exploratória permitiu identificar os sítios com características homogêneas de temperatura do solo, formando diferentes grupos quanto ao regime térmico da camada ativa. O primeiro grupo foi formado por VLF, Yellow e Refugio. A profundidade da superfície do permafrost para esse grupo ficou entre 1 e 2 m. Os sítios desse grupo tem como característica principal em comum a altitude, que varia de 31 a 49 m. Os sítios de Tyrrel e Ipanema compõem o grupo 2, que foi marcado pelo isolamento térmico em decorrência, respectivamente, da cobertura de neve e cobertura vegetal. O permafrost nesse sítio está a menos de 1 m. Cruzes foi o sítio de Keller mais quente, com regime térmico da camada ativa diferente dos demais sítios, que apresentou um período de cortina zero longo, e sua proximidade com a estação Ferraz pode ter influenciado nesse resultado.

2.5 REFERÊNCIAS

- BELTRAMI, H. On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: a report on the Pomquet station. *Global and Planetary Change*, 29 327–348, 2001.
- BEYER, L.; BOCKHEIM, J.G.; CAMPBELL, I.B.; CLARIDGE, G.G.C. Review Genesis, properties and sensitivity of Antarctic Gelisols. *Antarctic Science*, 11(4), 387–398, 1999.
- BURN, C. R., & SMITH, C. A. S. Observations of the “ Thermal Offset ” in Near-Surface Mean Annual Ground Temperatures at Several Sites near Mayo , Yukon Territory , Canada. *Arctic*, 41(2), 99–104, 1988.
- BROWN, R.J.E. 1970. Permafrost in Canada: its influence on northern development. Toronto: University of Toronto Press, 1970. 246p.
- CAMPBELL, I.B. & CLARIDGE, G.G.C. Antarctica: Soils, weathering processes and environment. Elsevier Sci. Publ. 1987.
- CANNONE, N., & GUGLIELMIN, M. Influence of vegetation on the ground thermal regime in continental Antarctica. *Geoderma*, 151(3-4), 215–223, 2009.
- CANNONE, N., EVANS, J. C. E., STRACHAN, R., & GUGLIELMIN, M. Interactions between climate, vegetation and the active layer in soils at two Maritime Antarctic sites. *Antarctic Science*, 18(3), 323–333, 2006.
- EVERITT, B.S.; DUNN, G. Applied multivariate analysis. London: Edward Arnold, 1991. 400p.
- FRENCH, H.M. The Periglacial Environment, 2nd Ed. Longman, Harlow, 1996. 341 p.
- GRUBER, S. & HAEBERLI, W. Mountain Permafrost. In: MARGESIN, R. (ed.) Permafrost Soils. Berlin: Springer, 2009. 348p.
- GRUNDSTEIN, A.; TODHUNTER, P.; MOTE, T. Snowpack control over the thermal off-set of air and soil temperatures in eastern North Dakota. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n.8, 2005.

GUGLIELMIN, M.; ELLIS, C. J.; CANNONE, N. Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas: a case study at Signy Island (Maritime Antarctica). *Geoderma*, v. 144, p.73-85, 2008.

HAMMER, O.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontological Electronica*, 4(1), 9p. 2001.

HINKEL, K.M. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. *Cold Regions Science and Technology*, v. 26, p.1-15, 1997.

HINKEL, K.M., PAETZOLD, F., NELSON, F.E.; BOCKHEIM, J.G. Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993 – 1999. *Global and Planetary Change*, v. 29, p. 293-309, 2001.

KEJNA, M. & LASKA, K. Spatial differentiation of ground temperature in the region of Arctowski Station, King George Island, Antarctica in 1996. *Polish Polar Research*, v.20, n. 3, p.221-241, 1999.

LANDIM, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos multivariados. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 208p.

LUETSCHG, M.; STOECKLI, V., LEHNING, M., HAEBERLI, W., & AMMANN, W. Temperatures in Two Boreholes at Fluela Pass, Eastern Swiss Alps: the Effect of Snow Redistribution on Permafrost Distribution Patterns in High Mountain Areas. *Permafrost and Periglacial Processes*, 297, 283–297, 2004.

MEDONÇA, F. & OLIVEIRA, I.M.D. Climatologia. São Paulo: Oficina de textos, 2007. 206p.

UGOLINI, F. C., & BOCKHEIM, J. G. (2008). Antarctic soils and soil formation in a changing environment: A review. *Geoderma*, 144, 1–8.

VIEIRA, G.; BOCKHEIM, J.; GUGLIELMIN, M. et al. Thermal State of Permafrost and Active-layer Monitoring in the Antarctic: Advances During the International Polar Year 2007 – 2009. *Permafrost and Periglacial Process*, v. 21, p. 182–197, 2010.

WARD, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, v.58, p.236-244, 1963.

CAPÍTULO 3

DIFUSIVIDADE TÉRMICA E MODELAGEM DA TEMPERATURA E UMIDADE DA CAMADA ATIVA NA PENÍNSULA KELLER

RESUMO

Esse capítulo teve como objetivo comparar os diferentes sítios de Keller através dos parâmetros obtidos a partir do ajuste do modelo preditivo de temperatura e umidade do solo. Para a modelagem da temperatura do solo, utilizou a equação de Fourier, que gera a curva senoidal da temperatura em função do tempo e da profundidade. Os parâmetros obtidos através do ajuste do modelo de temperatura do solo foram: média, amplitude, profundidade de amortecimento, ângulo de fase e difusividade térmica. Para estimativa da temperatura do solo *versus* umidade do solo foi utilizado o modelo de Ligand-Bilding, que representa uma curva a curva de crescimento sigmoidal. A validação dos modelos foi realizada através de regressão linear e análise de variância, e mostrou que o ajuste do modelo foi satisfatório. Em todos os sítios, a amplitude térmica diminuiu com a profundidade, o que era esperado devido às propriedades do solo que amortecem a onda de calor ao longo do perfil. Cruzes apresentou a maior média de temperatura do solo e menor amplitude térmica, decorrente da influência antrópica devido a sua maior proximidade com a Estação Antártica Comandante Ferraz em comparação com os demais sítios estudados. Tyrrel e Ipanema, que foram os sítios mais frios, apresentaram menor amplitude. A temperatura do solo a 10 cm variou de acordo com o sítio e atingiu o máximo entre os dias 21/01 e 13/02. A difusividade térmica aumentou exponencialmente com a profundidade do solo. O regime térmico da camada ativa em Keller está diretamente relacionado com o volume de água no solo, sendo que a difusividade térmica atinge um máximo entre 20 e 25% de umidade do solo.

3.1 INTRODUÇÃO

Estimar as propriedades térmicas do solo em áreas com permafrost com uso de modelos do balanço de energia é fundamental para estudos dos efeitos decorrentes das mudanças climáticas em ambientes periglaciais, pois estas propriedades regulam a transferência de calor através da camada ativa e, assim, influenciam a profundidade do congelamento e descongelamento anual (WAELBROECK, 1993; HINKEL, 1997, ROMANOVSKY & OSTERKAMP, 1997; WU et al., 2011; MICHEL et al., 2012). Para um dado nível de radiação solar, os principais parâmetros que definem o comportamento térmico de um solo são o calor específico e a condutividade térmica (PREVEDELLO, 1996).

O calor específico do solo é a quantidade de calor necessária para a unidade de massa de solo aumentar 1°C de temperatura em condições isobáricas. Os componentes minerais do solo têm calor específicos (C_p) muito próximos, o que confere ao solo seco um C_p entre 0,15 e 0,2 cal/g°C (BELTRAMI, 2001). A água, que possui C_p de 1cal/g°C, quando presente, aumenta o C_p do solo, que geralmente fica entre 0,3 e 0,5 cal/g°C, dependendo do conteúdo de umidade (PREVEDELLO, 1996). Isso significa que solos úmidos aquecem mais lentamente do que solos secos, reduzindo as variações de temperatura no solo (HINKEL, 1997). A matéria orgânica também contribui para a elevação do C_p do solo, sendo que em solos orgânicos secos o C_p é de cerca de 0,46 cal/g°C (OSTERKAMP & ROMANOVSKY, 1997; BELTRAMI, 2001). Multiplicando-se a massa do solo por seu C_p , obtém-se a capacidade térmica do solo, que é a quantidade de calor necessária para variar a sua

temperatura. A relação entre a capacidade térmica e o volume de solo fornece o valor da capacidade térmica por unidade de volume - quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1cm^3 de solo em 1°C (PREVEDELLO, 1996).

Para analisar a distribuição de calor ao longo do solo, deve ser considerada a condutividade térmica (KANE et al., 2001). A condutividade térmica é a quantidade de calor transferida por unidade de tempo, das camadas mais aquecidas para as camadas mais frias. A condutividade térmica das partículas do solo é maior do que a da água e muito mais elevada do que o ar. Assim, solos úmidos conduzem calor mais rapidamente para camadas mais profundas do que solos secos. Portanto, o fluxo de calor no solo depende do teor de umidade, do grau de agregação das partículas e da porosidade (HINKEL, 1997; BELTRAMI, 2001).

Uma vez que a água do solo pode estar presente na forma de vapor, os processos de transferência não-condutivos de calor são mais aplicáveis a solos (OSTERKAMP & ROMANOVSKY, 1997; KANE et al., 2001). Nesse contexto, as trocas de calor no solo podem ser melhor compreendidas através da medida de difusividade térmica. Assim, a estimativa desse parâmetro pode auxiliar no entendimento e monitoramento das relações entre solo e clima (HINKEL, 1997).

A difusividade térmica é a relação entre a condutividade e a capacidade térmica volumétrica. Essa medida fornece uma ideia da velocidade de avanço da frente de aquecimento do solo (PREVEDELLO, 1996). A difusividade é mais importante para o controle térmico do que a condutividade, porque expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. Vários modelos têm sido desenvolvidos e aplicados para estimar os valores da difusividade térmica através de séries de tempo de temperatura do solo, mas todos têm limitações (HINKEL, 1997). A comparação entre estimativas com valores observados subsidia a avaliação da adequação relativa de um modelo (EHLERS, 2005).

Modelos preditivos de temperatura do solo tem considerado somente a variação da temperatura em diferentes profundidades, mantendo-se “constante” a umidade do solo (WAELBROECK, 1993). No entanto, sendo o solo de origem orgânica ou mineral, sua composição química e seu teor de umidade leva a uma alteração no regime térmico, uma vez que apresenta sais em diferentes níveis de concentração ou matéria orgânica na sua composição. Essa condição causa um efeito de diminuição da temperatura de congelamento chamado crioscopia. Portanto, a análise da temperatura do solo deve ser realizada considerando-se a umidade do solo (WAELBROECK, 1993), principalmente em ambientes periglaciais, pois parte da água do solo solidifica sazonalmente (HINKEL, 1997).

A difusividade térmica aumenta com o aumento do conteúdo de umidade, atinge um máximo e depois diminui (PREVEDELLO, 1996; HINKEL et al., 2001). Isso ocorre porque a capacidade volumétrica aumenta mais do que condutividade térmica. Por esse mesmo motivo, solos com mais matéria orgânica tem difusividade térmica menor, pois aumenta sua capacidade térmica (PREVEDELLO, 1996; OSTERKAMP & ROMANOVSKY, 1997). A difusividade térmica também aumenta com a profundidade do solo, porém apresenta pouca variação dentro do perfil a partir de 10 cm (BELTRAMI, 2001).

Esse capítulo teve como objetivos: comparar o regime térmico da camada ativa nos diferentes sítios de Keller, Ilha Rei George, Antártica Marítima, a partir de parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo de temperatura do solo; determinar a difusividade térmica de acordo com a profundidade da camada ativa; analisar, através do ajuste de modelo para curva de crescimento, a relação entre temperatura e umidade do solo.

3.2 ANÁLISE DE DADOS

Séries temporais com padrões cíclicos ocasionados pelo efeito da sazonalidade, como a temperatura do solo, podem ser representadas por modelos senoidais da transformada de Fourier (BLOOMFIELD, 2000).

O modelo utilizando a equação de Fourier foi ajustado conforme a seguir:

$$T(z, t) = T_a + A \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{z}{D} + \varphi\right) \quad (3.1)$$

em que:

$T(z,t)$ – Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) a profundidade z (m) no tempo t ;

T_a – Temperatura do solo média ($^{\circ}\text{C}$);

A – Amplitude da temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$);

Z – profundidade (m);

D – profundidade de amortecimento (m);

ω – frequência angular (rad s^{-1});

φ – ângulo de fase (rad).

O modelo foi ajustada para cada profundidade do solo, utilizando-se as médias mensais de temperatura do solo, através do método dos mínimos quadrados com auxílio do aplicativo SigmaPlot 10[®]. Para descrição do ciclo anual foram utilizadas temperaturas do solo médias de cada mês, dessa forma $\omega = 2\pi / 12$.

Os modelos ajustados foram avaliados pelo coeficiente de regressão linear (R^2) entre os valores da temperatura do solo observados (X) e os estimados (Y). Avaliou-se também o coeficiente angular (b) da regressão $Y = b X$ e o erro padrão de estimativa do modelo. O ajuste do modelo foi avaliado pela análise de variância (ANOVA) a $p < 0,01$.

O atraso na transferência de calor de uma profundidade para outra foi calculado através da diferença entre o ângulo de fase entre duas profundidades, em que, $\varphi = 2\pi$ rad e equivale a 12 meses.

Com os valores de frequência angular (ω) e profundidade de amortecimento (D) foi possível estimar a difusividade térmica (K) para as diferentes profundidades nos perfis de solo monitorados. A difusividade térmica K ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) foi calculada por meio da equação:

$$D = \sqrt{2K/\omega} \quad (3.2)$$

A modelagem da umidade do solo foi realizada no Sigma Plot 10[®], através do ajuste do modelo Ligand-Bilding, que gera a curva sigmoideal:

$$T_s = T_{s,min} + \frac{T_{s,máx} - T_{s,min}}{1 + 10^{(a - U_s)b}} \quad (3.3)$$

em que T_s é a temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$). Os termos subscritos mín e máx, representam, respectivamente, a temperatura do solo mínima e máxima. U_s é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), e a e b são coeficientes a serem ajustados, onde a representa o ponto de inflexão da curva e b a inclinação da curva.

O ajuste do modelo de umidade do solo foi feito apenas para os sítios Yellow, Refúgio, Ipanema e Tyrrel, pois nos sítios de Cruzes e VLF não tinham sensores de umidade do solo instalados.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela análise de variância o ajuste dos modelos (Figura 3.1) em todas as profundidades e sítios foi estatisticamente significativo, ou seja, as estimativas dos modelos não apresentam diferenças estatísticas em relação aos dados observados de temperatura do solo. O ajuste do modelo para as médias mensais de temperatura do solo foi satisfatório, com coeficientes de regressão (r^2) entre 0,91 e 0,98, o que indicou que os modelos explicam entre 91 e 97% da variabilidade dos dados de temperatura do solo (Figura 3.2 e Tabela 3.1). O erro padrão de estimativa variou entre 0,09°C (0,36 e 0,63 m – Ipanema) a 0,67°C (0,45 m – Tyrrel). Esses valores representaram entre 5 e 32% da média absoluta da temperatura do solo das respectivas profundidades e sítios.

Análogo ao observado para a variação da temperatura do solo diária durante o ano, a amplitude da temperatura do solo mensal foi inversamente proporcional à profundidade, para todas as profundidades e sítios, assim, como a fase foi diretamente proporcional. No caso da fase, isso indicou que à medida que aumenta a profundidade ocorre maior atraso para os máximos de temperatura do solo em relação à temperatura do ar. O padrão da amplitude se destacou nos sítios VLF, Refúgio e Yellow, onde o aumento da amplitude com a profundidade foi mais pronunciado que nos sítios Tyrrel e Ipanema, sendo a menor variação da amplitude com a profundidade observada para Cruzes. As diferenças entre sítios quanto às variações de temperatura foram discutidas no capítulo 2.

Baseado na fase determinada para a profundidade 0,10 m (comum em todos os solos) observou-se a ocorrência da máxima temperatura do solo no início de fevereiro para Tyrrel (09/02) e Ipanema (05/02), enquanto para VLF, Yellow e Refúgio o máximo ocorreu antes e, no final de janeiro, sendo respectivamente, em 28/01, 21/01 e 27/01. Novamente o padrão em Cruzes se diferenciou das demais estações, com temperatura do solo máxima próxima a meados de fevereiro e em 13/02. O atraso de fase entre uma curva senoidal do modelo de temperatura e outra com profundidade adjacente variou de um local para outro, mas a transferência de calor ocorreu mais rapidamente entre as camadas do subsolo mais distantes da superfície.

No verão observou-se as maiores temperaturas do solo nas camadas mais superficiais, função das trocas de calor ocorrer com taxas maiores nessas camadas, devido à radiação incidente na superfície ser maior nessa estação do ano. À medida que aumenta a profundidade, a onda de calor tende a ser amortizada, como indicado pelo aumento da difusividade com a profundidade (Figura 3.3). No inverno ocorreu o inverso e, por isso, as maiores temperaturas nas camadas mais profundas, devido à mudança na direção do fluxo de calor que o solo armazenou durante as estações mais quentes (verão e outono). Como a superfície está mais fria, o fluxo de calor muda a direção, sendo das maiores profundidades para a superfície (FRENCH, 1996; FASSNACHT et al., 2006).

A maior difusividade térmica foi encontrada no sítio de Ipanema a 63 cm de profundidade (Figura 3.4). Segundo Albuquerque-Filho (2005) esse sítio contém elevada fração de matéria orgânica até 30 cm de profundidade no solo, teor que cai consideravelmente após 40 cm. A matéria orgânica aumenta a capacidade térmica do solo (OSTERKAMP & ROMANOVSKY, 1997; BELTRAMI, 2001), e isso pode ter provocado um gradiente de energia calorífica que explica o aumento abrupto na difusividade térmica desse sítio nessa profundidade.

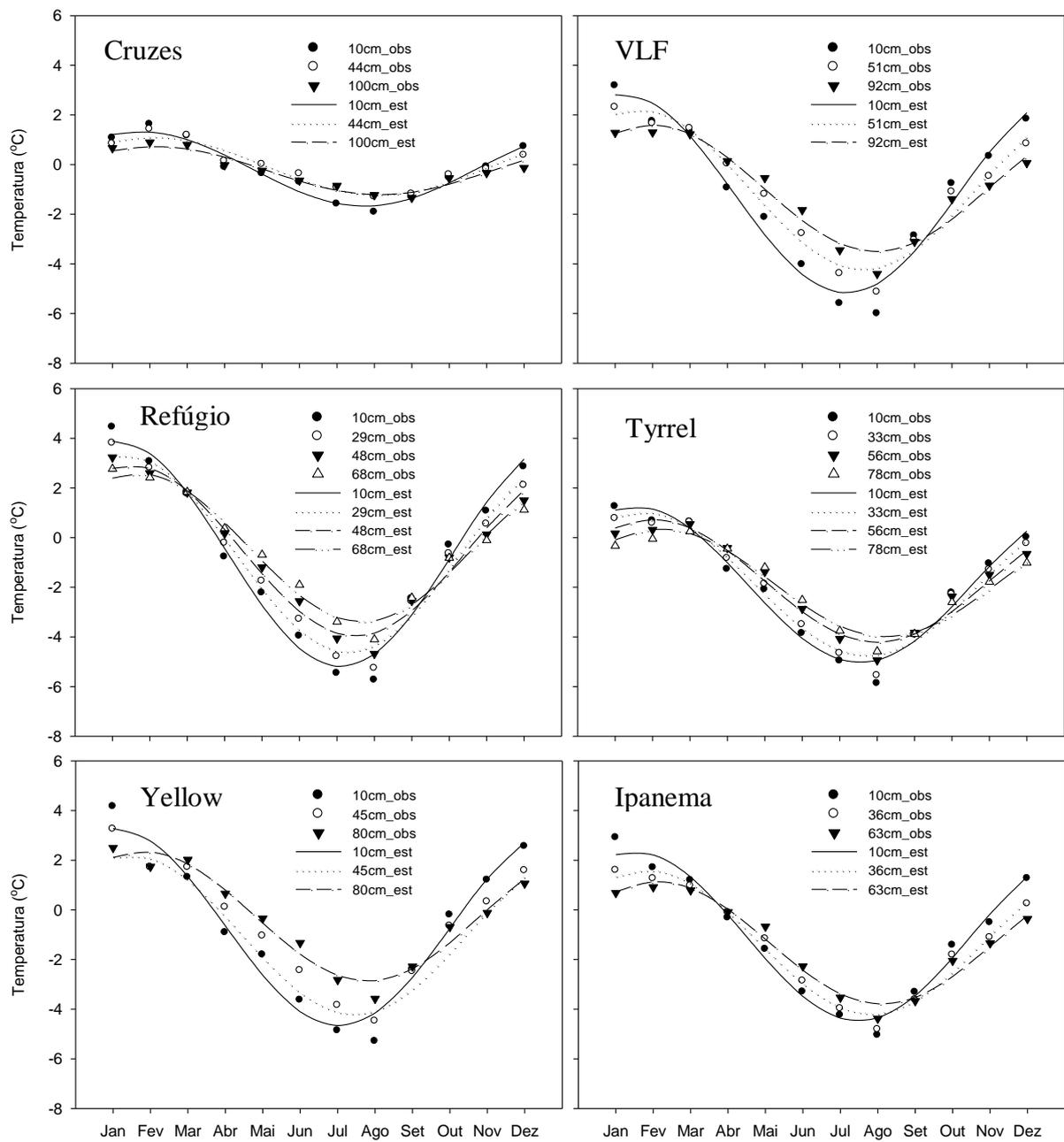


Figura 3.1 - Médias mensais da temperatura do solo em diferentes profundidades (obs = observada) e temperatura estimada através do ajuste do modelo (est = estimada).

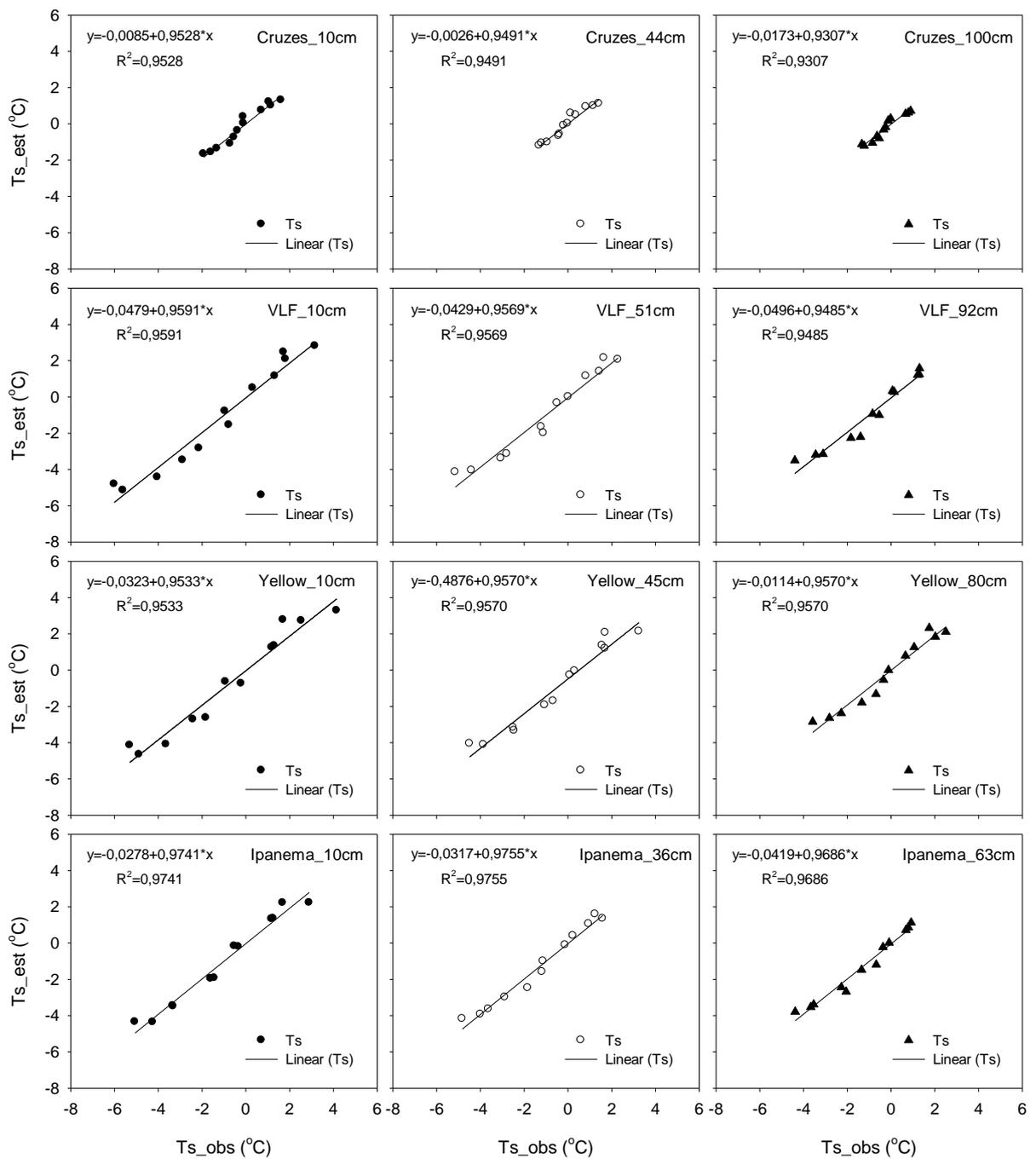


Figura 3.2 - Validação do ajuste do modelo preditivo de temperatura do solo nos seis sítios.

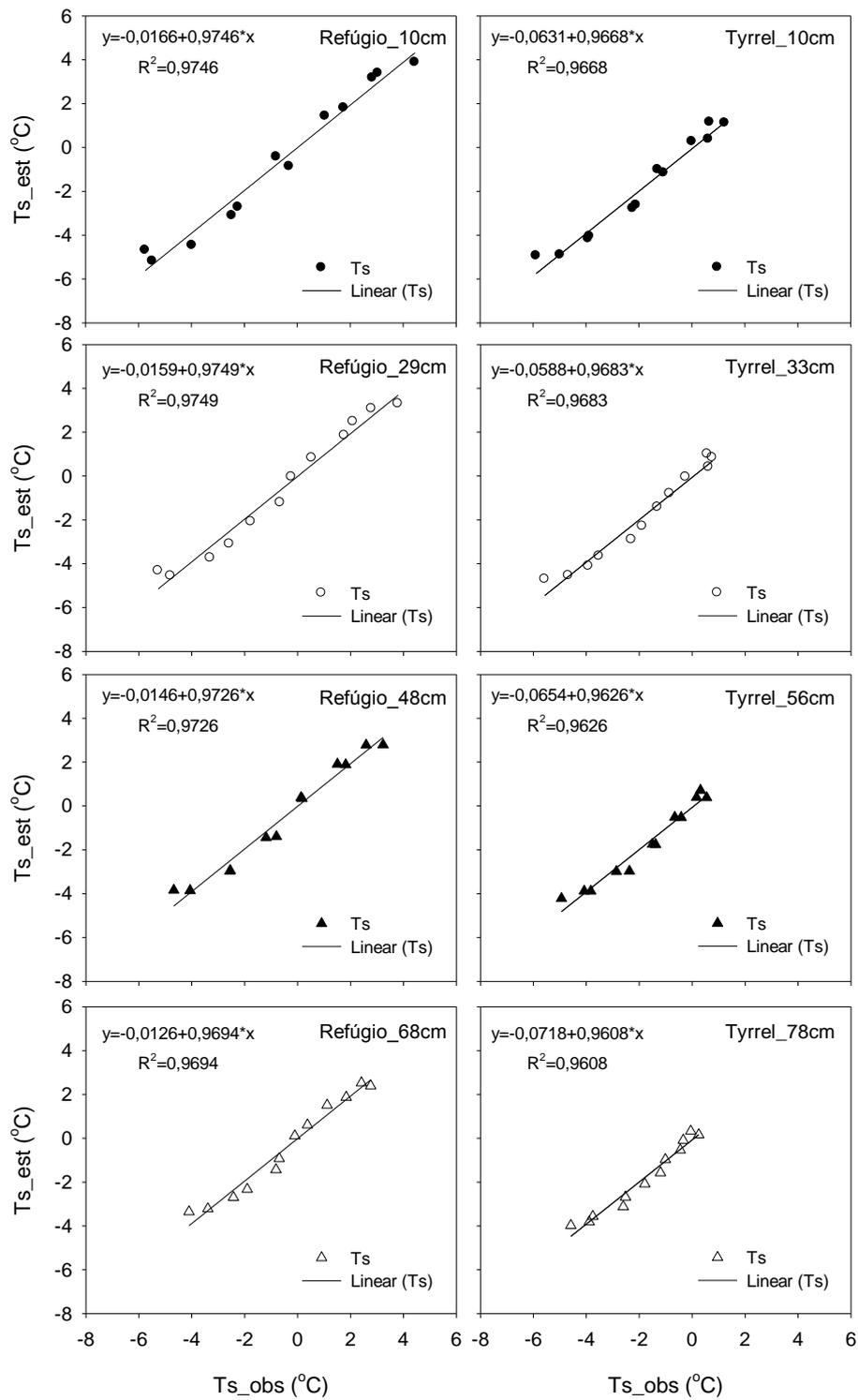


Figura 3.2 - Continuação.

Tabela 3.1 - Valores obtidos para os parâmetros do ajuste do modelo de temperatura em diferentes profundidades do solo em Keller

Sítio	Z (m)	Ts (°C)	A (°C)	D (m)	ϕ (rad)	K (m ² s ⁻¹)	R ²	EPE (°C)
Cruzes	0,10	-0,18	1,77	0,60	6,135	3,64E-08	0,95	0,24
	0,44	-0,04	1,36	2,74	0,038	7,58E-07	0,94	0,20
	1,00	-0,25	1,11	7,07	0,064	5,05E-06	0,93	0,19
VLF	0,10	-1,17	4,59	0,73	5,852	5,38E-08	0,96	0,58
	0,51	-1,00	3,72	3,47	6,074	1,22E-06	0,96	0,48
	0,92	-0,96	2,85	8,13	6,268	6,68E-06	0,95	0,42
Refugio	0,10	-0,65	5,09	0,86	5,802	7,55E-08	0,97	0,52
	0,29	-0,63	4,53	2,20	5,905	4,89E-07	0,97	0,45
	0,48	-0,53	3,95	3,41	6,014	1,17E-06	0,97	0,41
	0,68	-0,41	3,43	4,88	6,108	2,41E-06	0,97	0,37
Tyrrel	0,10	-1,90	3,56	0,78	5,528	6,15E-08	0,97	0,41
	0,33	-1,86	3,16	3,62	5,611	1,32E-06	0,97	0,37
	0,56	-1,75	2,74	5,31	5,757	2,85E-06	0,97	0,34
	0,78	-1,83	2,41	7,13	5,846	5,13E-06	0,96	0,31
Yellow	0,10	-0,69	4,73	0,57	5,773	3,28E-08	0,95	0,62
	0,45	-0,53	3,87	3,41	5,984	1,17E-06	0,91	0,67
	0,80	-0,27	3,04	5,12	6,175	2,65E-06	0,96	0,39
Ipanema	0,10	-1,07	3,98	0,64	5,489	4,14E-08	0,97	0,11
	0,36	-1,30	3,21	3,53	5,655	1,26E-06	0,97	0,09
	0,63	-1,33	2,65	8,60	5,812	7,47E-06	0,97	0,09

Nota: Z = profundidade do solo; Ts = Temperatura média; A=amplitude da temperatura; D= profundidade de amortecimento; ϕ = ângulo de fase; K = difusividade; R²=coeficiente de regressão linear; EPE = erro padrão da estimativa.

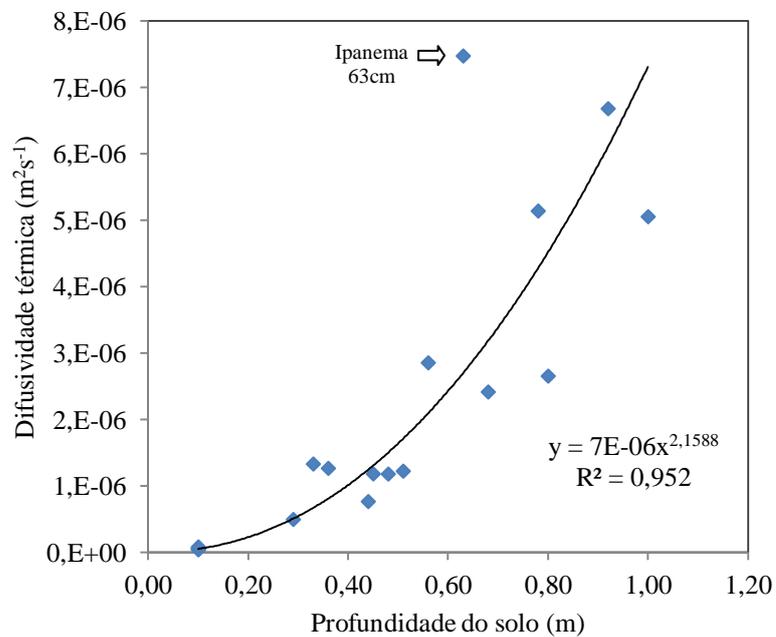


Figura 3.3 - Relação entre difusividade térmica e profundidade dos solos de Keller.

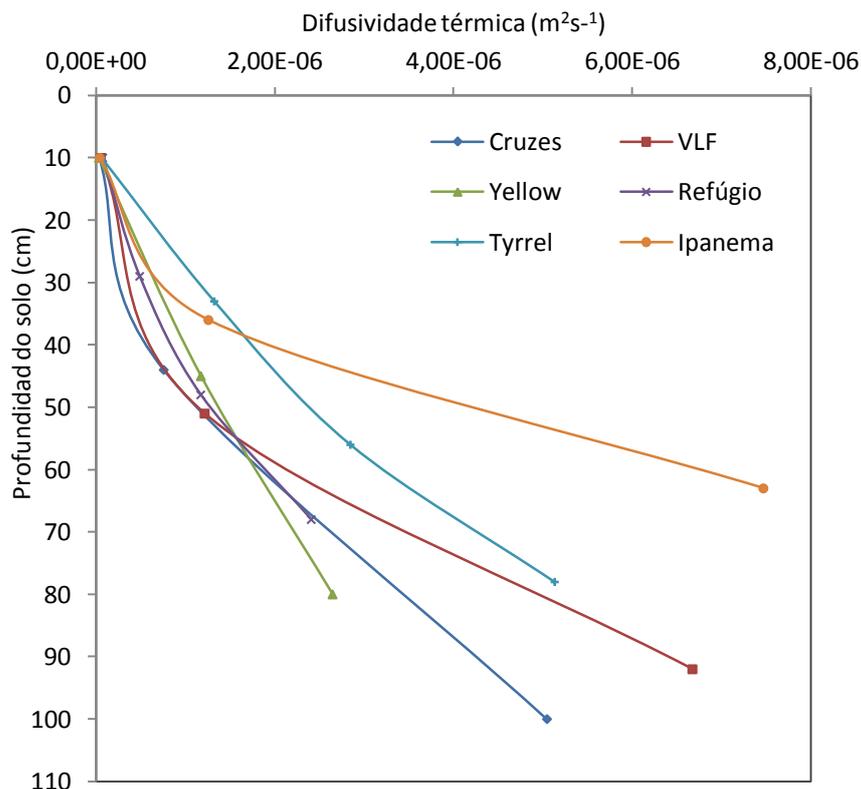


Figura 3.4 - Distribuição da difusividade térmica da camada ativa nos sítios de Keller.

De maneira geral, foi observado que a difusividade térmica aumentou exponencialmente com a profundidade da camada ativa, o que corrobora os resultados de Beltrami (2001). Já Michel et al. (2012) estudando dois sítios na mesma ilha (Rei George) e com o mesmo sistema, encontraram comportamento inverso, ou seja, a difusividade térmica diminuiu com a profundidade. A menor difusividade térmica encontrada nos sítios de Tyrrel, Yellow e Refúgio pode ser explicada pela textura argilosa desses solos, que aumenta sua capacidade térmica, conforme verificado por Osterkamp e Romanovsky (1997).

Na Figura 3.5 são apresentadas as médias mensais da umidade do solo no período estudado (2008 a 2011), obtidas nas últimas camadas de quatro sítios: Yellow, Tyrrel, Refúgio e Ipanema. Em Tyrrel há uma maior umidade do solo (média de 29%), seguido de Refúgio (27,5%), Yellow (23%) e Ipanema (14%). Essa diferença na umidade pode estar associada à textura, uma vez que solos mais argilosos formam mais agregados e, conseqüentemente, tem mais poros armazenar água (PREVEDELLO, 1996). Em Ipanema, onde a umidade foi menor, o solo é mais arenoso que nos demais sítios (argilosos), ao contrário de Tyrrel que possui mais argila.

O ajuste dos modelos de umidade do solo em função da temperatura (Figura 3.6) em todas as profundidades e sítios foi estatisticamente significativo pela análise de variância ($p < 0,05$), ou seja, as estimativas dos modelos não apresentam diferenças significativas em relação aos dados observados de temperatura do solo. O modelo para as médias mensais de umidade do solo *versus* temperatura foi satisfatório, com coeficientes de regressão (r^2) entre 0,95 e 0,97 (Tabela 3.2). O erro padrão de estimativa variou entre 1,32% (Yellow) a 2,19% (Refúgio).

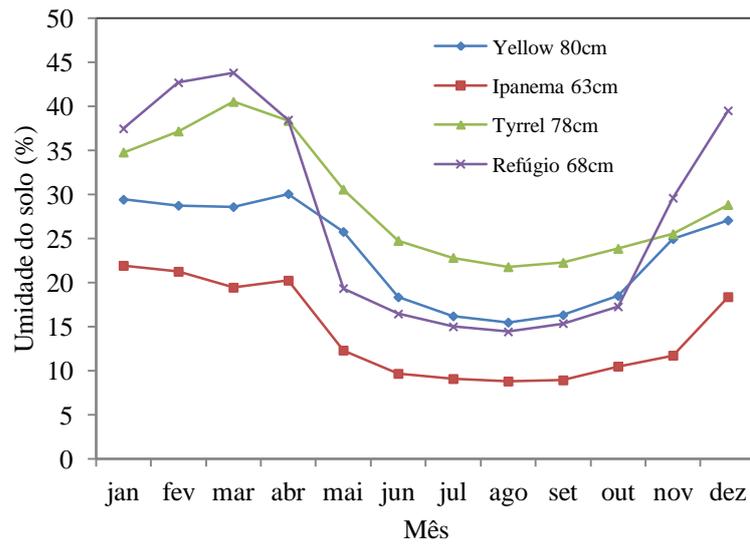


Figura 3.5 - Médias mensais de umidade do solo obtidos em quatro sítios de Keller.

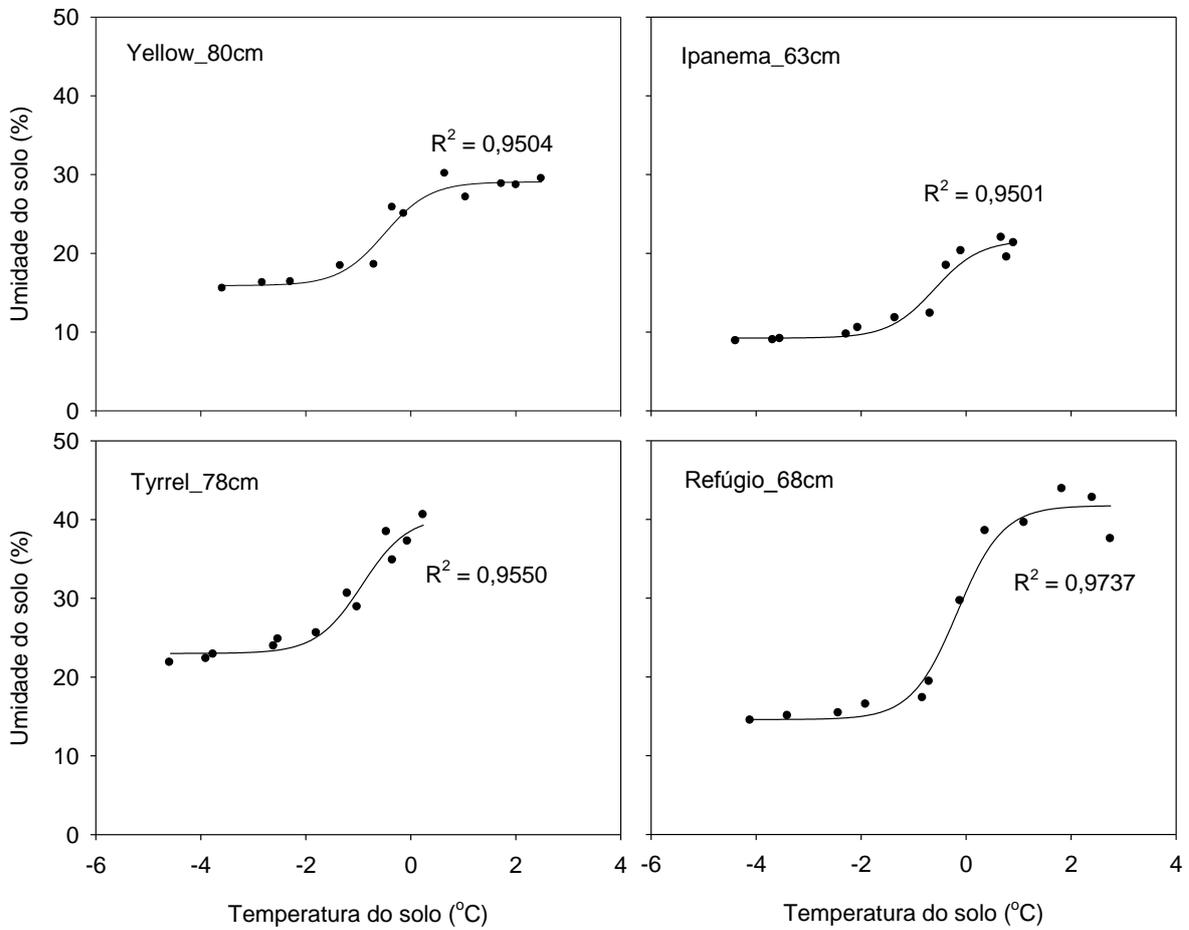


Figura 3.6 - Relação entre temperatura e umidade do solo nos sítios de Keller.

Tabela 3.2 - Valores obtidos para os parâmetros do ajuste do modelo de temperatura *versus* umidade do solo nos diferentes sítios

Sítio-Prof.	U _{máx} (%)	U _{mín} (%)	Ts-pi (°C)	R ²	EPE (%)
Yellow-80cm	29,0728	15,8988	-0,5015	0,9749	1,4322
Ipanema-63cm	21,6747	9,2280	-0,6024	0,9747	1,3270
Tyrrel-78cm	40,3967	23,0031	-0,9270	0,9773	1,6044
Refúgio-68cm	41,7444	14,5943	-0,1694	0,9867	2,1868

Nota: Prof.= profundidade do solo; U_{máx} e U_{mín} = respectivamente, umidade máxima e mínima do solo; Ts-pi = temperatura do solo no ponto de inflexão da curva; R² = coeficiente de regressão linear do modelo; EPE = erro padrão da estimativa.

Através do modelo, verificou-se que ocorreu deslocamento no ponto de congelamento da água no solo, que ficou abaixo de 0°C nos quatro sítios. Essa diminuição ocorre devido à presença de sais no solo (WAELBROECK, 1993). Em Tyrrel, onde ocorreu maior deslocamento do ponto de congelamento (-0,92°C) devido ao maior teor de sais no solo em comparação com os outros sítios, enquanto no Refúgio, onde essa quantidade de sais foi menor, o ponto de inflexão da curva ocorreu na temperatura de -0,17°C. Em Yellow e Refúgio, a temperatura aumenta e estabiliza conforme determinada umidade do solo, enquanto em Tyrrel e Ipanema a curva é interrompida, pois a temperatura do solo não aumenta devido ao isolamento térmico desses sítios ocasionado, respectivamente, pelo acúmulo de neve e pela vegetação.

A correlação entre a difusividade térmica estimada e a umidade do solo medida foi elevada ($r^2=0,99$), expressa por uma equação polinomial (Figura 3.7). O resultado corrobora com os obtidos por Hinkel et al. (2001) em solos do Alaska sob influência do permafrost, onde também foi observada um ponto “ótimo” de umidade do solo para difusividade térmica, em torno de 20%. Segundo os autores, depois desse ponto, a difusividade decresce e estabiliza. Isso ocorre porque a capacidade térmica volumétrica do solo aumenta positivamente com a quantidade de água no solo, até que se torna maior que a condutividade e, assim, diminui a difusividade térmica (PREVEDELLO, 1996).

Em contrapartida, Ikard et al. (2009) encontrou uma correlação positiva quase linear entre difusividade térmica e umidade do solo nos vales secos da Antártica. Segundo esses autores o transporte de calor em solos com camada ativa constitui importante ferramenta para entender as potenciais respostas a alterações no equilíbrio da energia superficial, em particular no contexto de alterações climáticas. Com o aumento da espessura da camada ativa, ocorre aumento na umidade do solo e, conseqüentemente, na difusividade térmica, o que permite maior troca de calor entre a atmosfera e o subsolo.

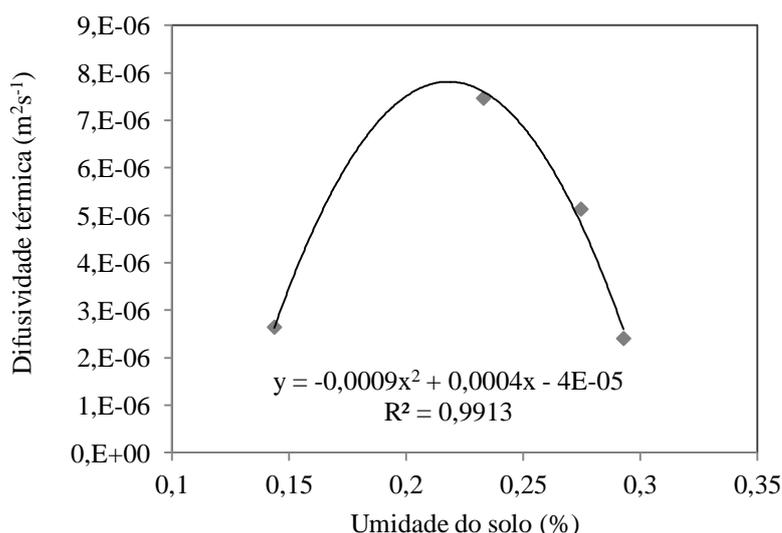


Figura 3.7 - Difusividade térmica em função do volume de água no solo.

3.4 CONCLUSÕES

Através dos parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo de temperatura do solo foi possível comparar os diferentes sítios. Os sítios de Tyrrel e Ipanema apresentaram menor amplitude, devido ao seu isolamento térmico. No sítio Cruzes a amplitude térmica foi ainda menor, provavelmente devido à influência da estação antártica Comandante Ferraz, que pode estar alterando seu regime térmico.

A difusividade térmica estimada mostrou que a matéria orgânica influenciou consideravelmente o regime térmico da camada ativa em Ipanema. Nos demais sítios, a difusividade foi influenciada principalmente pela textura do solo. A difusividade aumentou exponencialmente em função da profundidade do solo.

A umidade do solo foi maior nos solos com maior quantidade de argila e foi evidente sua relação com a temperatura. O ajuste do modelo foi satisfatório, e mostrou que o ponto de congelamento da água no solo sofreu deslocamento de até $-0,92^{\circ}C$, em decorrência da quantidade de sais presentes no solo e do isolamento térmico de alguns sítios.

O ajuste dos modelos de temperatura e umidade do solo foi adequado para os sítios de Keller, fornecendo parâmetros para descrever melhor o regime térmico da camada ativa.

3.5 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE-FIHO, M.R. Geoquímica de solos da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica, como subsídio ao monitoramento ambiental. 129p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- BELTRAMI, H. On the relationship between ground temperature histories and meteorological records: a report on the Pomquet station. *Global and Planetary Change*, 29 327–348, 2001.
- BLOOMFIELD, P. *Fourier analysis of time series: an introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2000. 261p.

EHLERS, R.S. Análise de séries temporais. Departamento de Estatística, UFPR, 2005. Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/~ehlers/notas>. Acesso em: 21/11/2010.

FASSNACHT, S.R. et al. Effects of Averaging and Separating Soil Moisture and Temperature in the Presence of Snow Cover in a SVAT and Hydrological Model for a Southern Ontario, Canada, Watershed. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 298–304, 2006.

FRENCH, H.M. *The Periglacial Environment*, 2nd Ed. Longman, Harlow, 1996. 341 p.

HINKEL, K.M. Estimating seasonal values of thermal diffusivity in thawed and frozen soils using temperature time series. *Cold Regions Science and Technology*, v. 26, p.1-15, 1997.

HINKEL, K.M., PAETZOLD, F., NELSON, F.E.; BOCKHEIM, J.G. Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993 – 1999. *Global and Planetary Change*, v. 29, p. 293-309, 2001.

IKARD, S. J., GOOSEFF, M. N., BARRETT, J. E., & TAKACS-VESBACH, C. Thermal characterisation of active layer across a soil moisture gradient in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Process*, v. 20, p. 27–39, 2009.

KANE, D. L., HINKEL, K. M., GOERING, D. J., HINZMAN, L. D., OUTCALT, S. I. Non-conductive heat transfer associated with frozen soils. *Global and Planetary Change*, 29, 275–292, 2001.

MICHEL, R. F. M., SCHAEFER, C. E. G. R., POELKING, E. L., SIMAS, F. N. B., FERNANDES FILHO, E. I., BOCKHEIM, J. G. Active layer temperature in two Cryosols from King George Island, Maritime Antarctica. *Geomorphology*, 155-156, 12–19, 2012.

OSTERKAMP, T. E., & ROMANOVSKY, V. E. Freezing of the Active Layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Process*, 8, 23-44, 1997.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Salesward-Discovery, Curitiba, 1996. 446p.

ROMANOVSKY, V. E., & OSTERKAMP, T. E. Thawing of the Active Layer on the Coastal Plain of the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Process*, 8, 1–22, 1997.

WAELBROECK, C. Climate-soil processes in the presence of permafrost: a systems modelling approach. *Ecological Modelling*, v. 69, p.185-225, 1993.

WU; S.H.; JANSSONA, P.E.; ZHANG, X.Y. Modelling temperature, moisture and surface heat balance in bare soil under seasonal frost conditions in China. *European Journal of Soil Science*, v. 62, p.780–796, 2011.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS PARA DADOS DE TEMPERATURA DO SOLO DA PENÍNSULA KELLER - PERÍODO DE 2008 A 2011

RESUMO

Com o objetivo de identificar os períodos mais frequentes (padrões) da temperatura do solo, no período de 2008 a 2011, em seis sítios de monitoramento da camada ativa da península Keller, foram aplicadas diferentes técnicas de análise de séries temporais (harmônica e espectral). O período com maior frequência foi o anual, seguido do intra-anual (estações do ano) e interanual (modo climático). Nos sítios com maior temperatura do solo (Cruzes, VLF, Refúgio e Yellow), a frequência intra-anual foi marcada por três períodos de quatro meses cada, onde dois períodos correspondem ao inverno e verão. O outro período é formado pela primavera e outono, sendo que cada uma destas estações tiveram duração de dois meses. Os locais mais frios (Tyrrel e Ipanema) apresentaram uma variação intra-anual de seis meses, composta por dois períodos: quente e frio. Através da análise espectral foi possível identificar um período significativo interanual, onde ocorreu uma anomalia na temperatura do solo, com temperaturas mais frias que o esperado, que provavelmente corresponde à influência do Modo Climático Anular Sul (SAM), que ocorreu entre na região entre os anos de 2009 e 2010. Os resultados demonstram o potencial indicador da temperatura do solo da região como ferramenta no monitoramento ambiental frente às mudanças climáticas.

4.1 INTRODUÇÃO

Uma série temporal é uma coleção de observações feitas sequencialmente ao longo do tempo. A característica mais importante deste tipo de dados é que as observações vizinhas são dependentes (autocorrelação), sendo fundamental identificar, analisar e modelar esta dependência. Enquanto em modelos de regressão a ordem das observações é irrelevante para análise, em séries temporais a ordem dos dados é premissa (MORETTIN & TOLOI, 2005).

Em geociências, comumente utilizam-se medidas obtidas a partir de instrumentação digital com alta sensibilidade e com alta resolução nos domínios temporal, espacial e espectral. Desta forma, as atuais observações *in situ* e métodos sofisticados de processamento, visualização e análise têm gerado séries temporais com alto grau de complexidade e em grande quantidade (ALCÂNTARA, 2010).

Como a maior parte dos procedimentos estatísticos foi desenvolvida para analisar observações independentes, o estudo de séries temporais requer a aplicação de técnicas específicas, pois: observações correlacionadas são mais difíceis de analisar; sendo necessário considerar a ordem temporal das observações; fatores complicadores como presença de tendências e variação sazonal ou cíclica podem ser difíceis de estimar ou remover; a seleção de modelos pode ser bastante complexas, e as ferramentas podem ser de difícil interpretação; é mais difícil de lidar com observações perdidas e dados discrepantes devido a natureza sequencial (EHLERS, 2005). Portanto, além das técnicas estatísticas tradicionais, faz-se necessária a caracterização de outros parâmetros a partir das flutuações não-lineares, quebras de simetria, memória de médio e alto alcance e regimes intermitentes que podem estar presentes na variabilidade das séries (HEGGER et al., 1999).

Em muitas aplicações, as séries temporais podem ser vistas como uma combinação de componentes periódicos ou quase-periódicos, os quais são sobrepostos em uma tendência de

longo período e ruídos aleatórios de alta frequência. As componentes periódicas são assumidas como sendo fixas, ou que suas amplitudes e fases variam suavemente sobre o comprimento de um registro (WILKS, 2006).

A análise de Fourier é um dos métodos mais comuns de identificação de componentes periódicos em séries temporais quase estacionárias. Os componentes providos pela análise de Fourier podem ser utilizados para a reconstrução de cada valor da série temporal de forma acurada sobre seu intervalo principal. Pelo mesmo princípio, a contribuição relativa que um dado componente fornece sobre a variância total da série temporal pode ser mensurada por meio da técnica da análise espectral, que é utilizada para particionar a variância de uma série temporal como uma função da frequência (ALCÂNTARA, 2010). A análise espectral é a análise de padrões cíclicos na série temporal. A proposta da análise espectral é a de identificar as flutuações sazonais de comprimentos diferentes.

De acordo com Chatfield (1999), há vários motivos para se realizar a análise de séries temporais. Esses podem ser classificados como: descrição, previsão, explicação e controle. A descrição consiste basicamente em conhecermos os padrões de uma série temporal. Portanto, o primeiro passo na análise é elaborar o gráfico da série temporal com o objetivo de observar as principais propriedades da série como: tendência, ciclo sazonal e valores extremos. Dada uma série temporal observada, podem-se prever os valores futuros desta (previsão), e quando as observações são tomadas de duas ou mais variáveis, pode-se saber se a variação de uma série pode explicar a variação das outras (explicação). O controle implica na geração de séries temporais para medir a qualidade de um processo. Em séries climáticas longas, a análise temporal permite identificar padrões intra-anuais (estações), anuais e interanuais (anomalias) (ALCÂNTARA, 2010).

Na Antártica, o principal modo de variabilidade da circulação atmosférica é o Modo Anular do Hemisfério Sul (*Southern Annular Mode* – SAM) (EVANGELISTA, 2011). Esse modo de variabilidade reflete o deslocamento circumpolar das massas de ar como função do gradiente de pressão atmosférica entre as latitudes médias e a costa da Antártica. Uma consequência desse evento é um aumento da velocidade dos ventos que circundam a Antártica (MARSHALL, 2003). Valores positivos do índice SAM, normalmente, estão relacionados ao aquecimento da Península Antártica e trazem resfriamento ao setor ocidental do continente, ocorrendo o contrário para os casos de SAM negativo (EVANGELISTA, 2011).

As ilhas que compõem o arquipélago das Shetlands do Sul, localizado a noroeste da península Antártica, apresentam grande sensibilidade às mudanças climáticas por estarem situadas geograficamente numa região onde a temperatura se encontra no limite do ponto de fusão do gelo (BRAUN, 2001; VIEIRA et al., 2010). Nesse contexto, esse estudo teve como objetivo realizar uma análise de séries temporais dos dados de temperatura do solo (período de 2008 a 2011) da Península Keller, Ilha Rei George, Antártica Marítima, buscando-se identificar e explicar os períodos mais frequentes e relacionar o regime térmico da camada ativa com modos climáticos regionais.

4.2 ANÁLISE DE DADOS

Eventos cíclicos determinísticos, nos quais a série de dados varia no tempo, podem ser representados como combinações de funções senos e cossenos (Análise Harmônica). A análise do domínio das frequências (Análise Espectral) desses eventos permite avaliar a contribuição de diferentes escalas de tempo na composição da série (WILKS, 2006).

Qualquer série de dados de n amostras pode ser representada exatamente pela combinação de senos e cossenos, que oscilam em torno de um valor médio (\bar{y}), ajustados a $n/2$ funções harmônicas, como segue:

$$y_i = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ C_k \cos \left[\frac{2\pi Kt}{n} - \theta_k \right] \right\} = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ A_k \cos \left[\frac{2\pi Kt}{n} \right] + B_k \sin \left[\frac{2\pi Kt}{n} \right] \right\} \quad (4.1)$$

Em que, k é um inteiro que varia até $n/2$, $C_k = \left[(A_k^2 + B_k^2)^{1/2} \right]$ é a amplitude, $\theta_k [= \arctan (B_k/A_k)]$ é o ângulo de fase do harmônico, t é o tempo. Na prática, C_k é o valor máximo em torno do qual a média flutua e θ_k é o ângulo que representa o tempo onde a função harmônica é máxima. Os coeficientes $A_k [= C_k \cos (\theta_k)]$ e $B_k [= C_k \sin(\theta_k)]$ foram ajustados às séries mensais de temperatura do solo, pelo método dos mínimos quadrados, considerando a função harmônica como uma regressão não linear múltipla.

Não é prático se utilizar todos os harmônicos possíveis ($n/2$) para representar a série. Na definição das frequências nas quais os harmônicos representam a maior parte da variabilidade da série se aplica à análise espectral. Como as relações entre as variáveis estimadoras dos harmônicos e a série de dados y_t independem das demais funções harmônicas, que também podem ser usadas para representar a série, a proporção da variância de y_t representada por cada harmônico também é invariável. Expressando essa proporção como r^2 , comumente aplicado em análises de regressão, definiu-se o r^2 para o k -ésimo harmônico como:

$$r_k^2 = \frac{\frac{n}{2} C_k^2}{(n-1)S_y^2} \quad (4.2)$$

em que, o numerador é a soma dos quadrados da regressão para o k -ésimo harmônico e S_y^2 é a variância da amostra e, assim, o denominador representa a soma dos quadrados total. Ou seja, $r^2 = \sum_{k=1}^n r_k^2$. No presente caso, a análise espectral se baseou na variação do r_k^2 em função da frequência, sendo considerados apenas o primeiro e segundo harmônicos das séries mensais de temperatura do solo.

As análises harmônica e espectral foram baseadas, respectivamente, nas médias mensais e diárias de temperatura do solo em diferentes profundidades nos seis sítios de Keller. O período analisado foi março de 2008 a fevereiro de 2011, totalizando uma série 36 meses. Nos sítios de Cruzes, VLF e Yellow não havia dados para o mês de fevereiro de 2011, sendo esse valor substituído pela média de temperatura do solo para esse mês, ocorrida nos demais anos.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série de 36 meses dos dados de temperatura do solo nos seis pontos de monitoramento apresentou tendência quase estacionária, o que justifica a aplicação de técnicas de análises de séries temporais para identificação das frequências (periodograma). A análise espectral revelou que o período de maior densidade se refere ao ciclo anual (12 meses), que contribuiu no mínimo com 50% na variância dos dados obtidos por todos os sensores. Portanto, a análise harmônica (Figura 4.1) foi baseada nos dados estimados pelos valores obtidos com o 1º harmônico (12 meses).

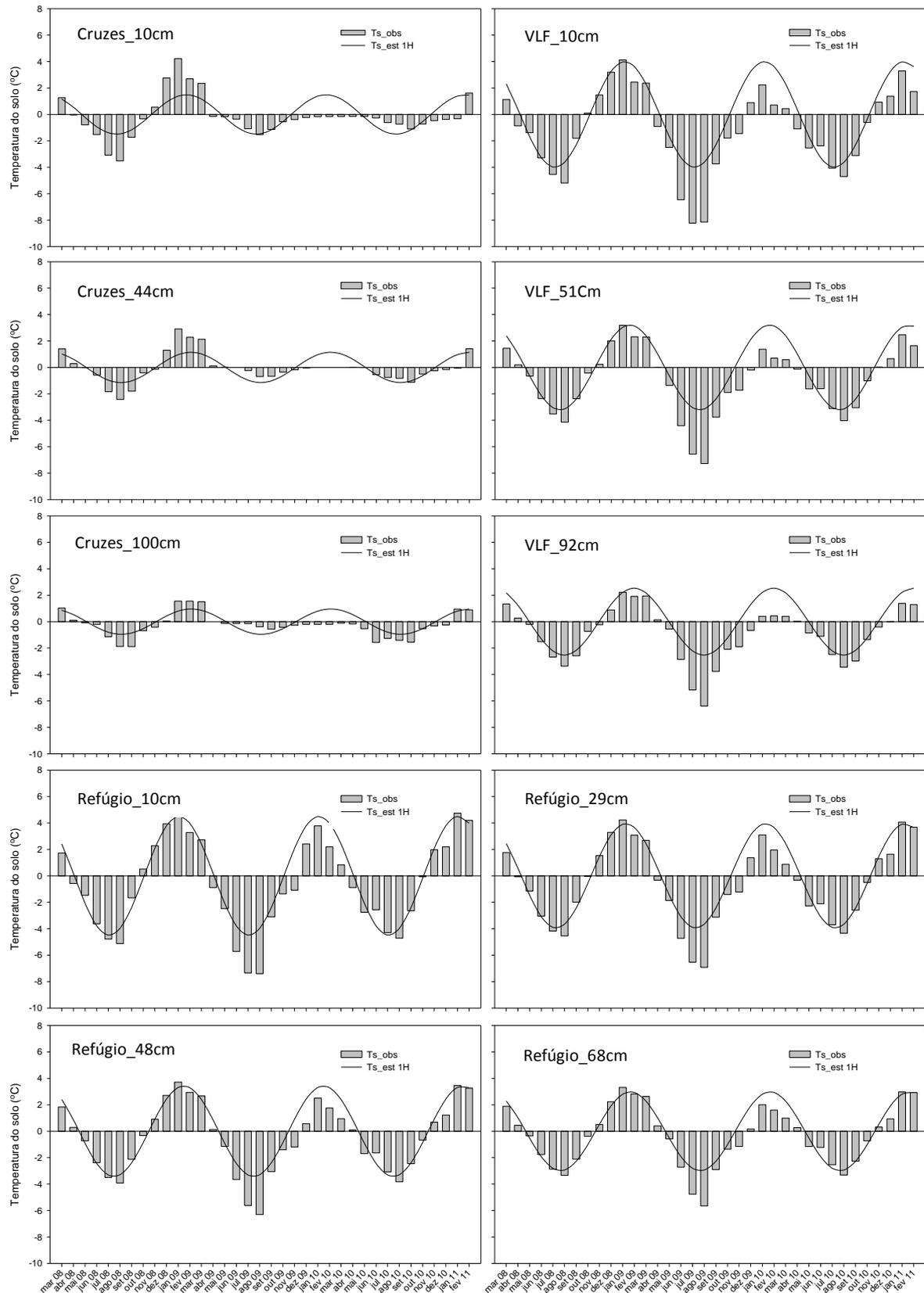


Figura 4.1 - Análise harmônica da temperatura do solo (Ts) em diferentes profundidades dos sítios de monitoramento de Keller.

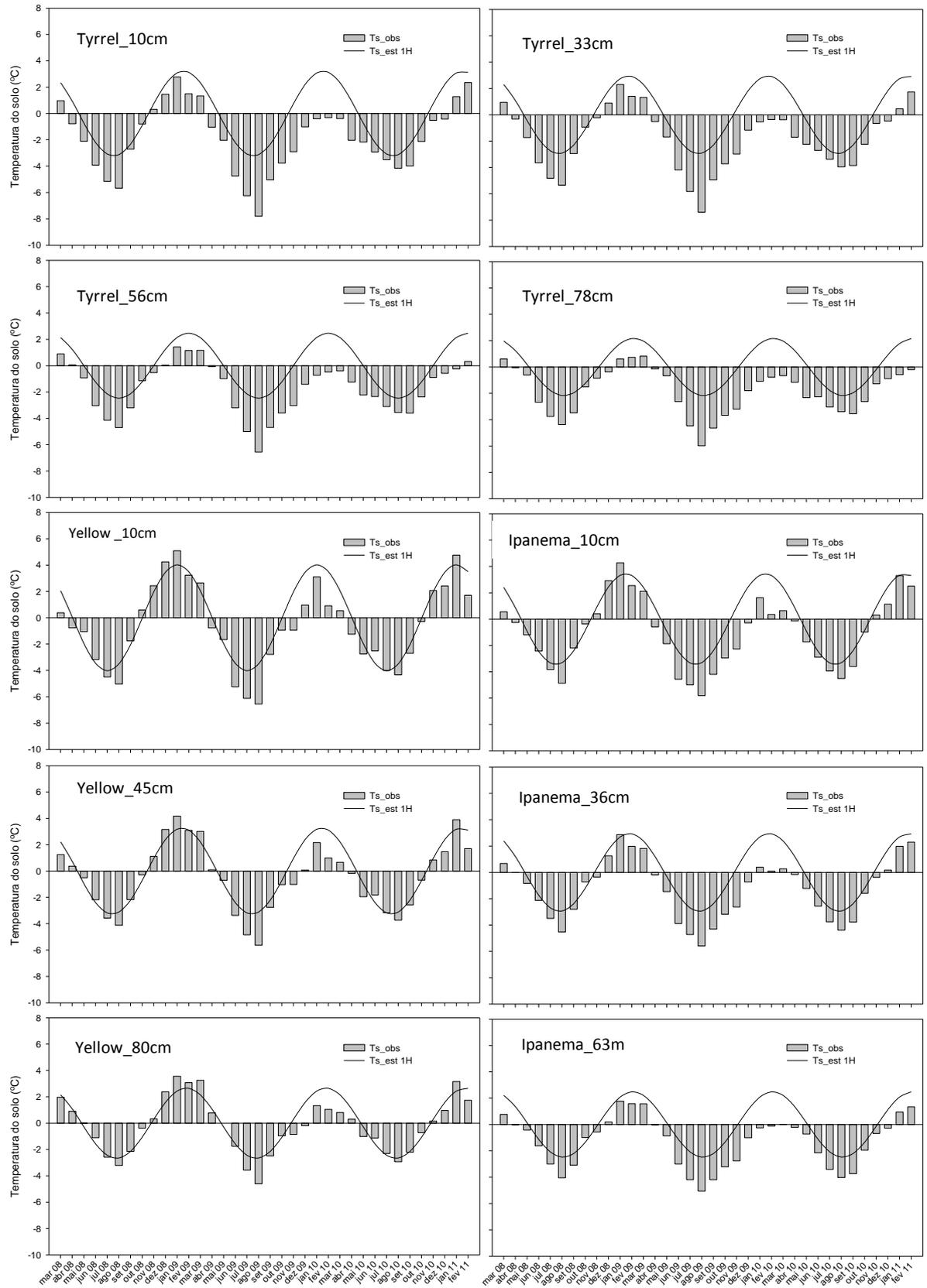


Figura 4.1 - Continuação.

O segundo período de maior densidade (2º harmônico) foi aquele relacionado à sazonalidade (quatro meses). Apesar das quatro estações do ano representarem um período de três meses cada, percebeu-se em geral que, pelo menos para os solos nas condições estudadas (ambiente periglacial), o efeito dessa sazonalidade pode ser dividido em três períodos de quatro meses ao longo do ano, sendo um período quente, com temperaturas médias do solo acima de 0°C, um período de inverno rigoroso marcado pelo clima frio sempre abaixo de 0°C, e um período de transição (congelamento e descongelamento) com cerca de dois meses cada.

Nas camadas do solo mais profundos em Tyrrel (56 e 78 cm) e Ipanema (63 cm) a análise espectral mostrou que a densidade do período de quatro meses foi menos significativa, sendo o segundo harmônico representado por um período de seis meses. Isso significa que para esses locais, a temperatura do solo responde apenas a dois períodos ao longo do ano – quente e frio – nos quais a sazonalidade perde o efeito conforme aumenta a profundidade no solo, provavelmente devido ao isolamento térmico a presença de permafrost até 1m de profundidade no solo (discutida no capítulo 2).

A análise harmônica, utilizando apenas os coeficientes (seno e cosseno) obtidos para o período correspondente a 12 meses (1º harmônico), permitiu descrever a amplitude e a fase da temperatura ao longo do período estudado de forma satisfatória, conforme demonstrado pelo coeficiente de regressão linear (r^2) quando comparamos os dados observados aos estimados. Esse coeficiente manteve-se num valor acima de 0,8, exceto para as profundidades de Cruzes, onde se obteve um valor em torno de 0,5.

Na análise harmônica foi possível identificar um período, que compreende os meses entre maio de 2009 (mês 14) a maio 2010 (mês 26), quando a temperatura do solo nos sítios foi mais baixa do que o esperado, com exceção de Cruzes, que será discutido mais adiante. Esse período identificado na análise pode estar associado a um modo climático.

A análise espectral ilustrou a energia do espectro da frequência (em dias), corroborando os resultados obtidos na análise harmônica, porém através dessa análise pode-se observar melhor a distribuição dessa energia ao longo do período analisado (Figura 4.2). A energia da frequência equivalente ao período anual aumentou com profundidade do solo, enquanto a energia correspondente oriunda da sazonalidade diminuiu. O perfil Cruzes foi uma exceção a esse último padrão, onde a frequência sazonal ficou mais acentuada a 1 m de profundidade.

Um fato interessante, que se pode constatar, foi uma frequência significativa, correspondente a um período maior que o anual (aproximadamente entre 420 e 525 dias), que provavelmente se refere ao efeito de algum modo de variabilidade climática (anomalia) sobre a temperatura do solo, no qual sua influência foi aumentando positivamente com a profundidade.

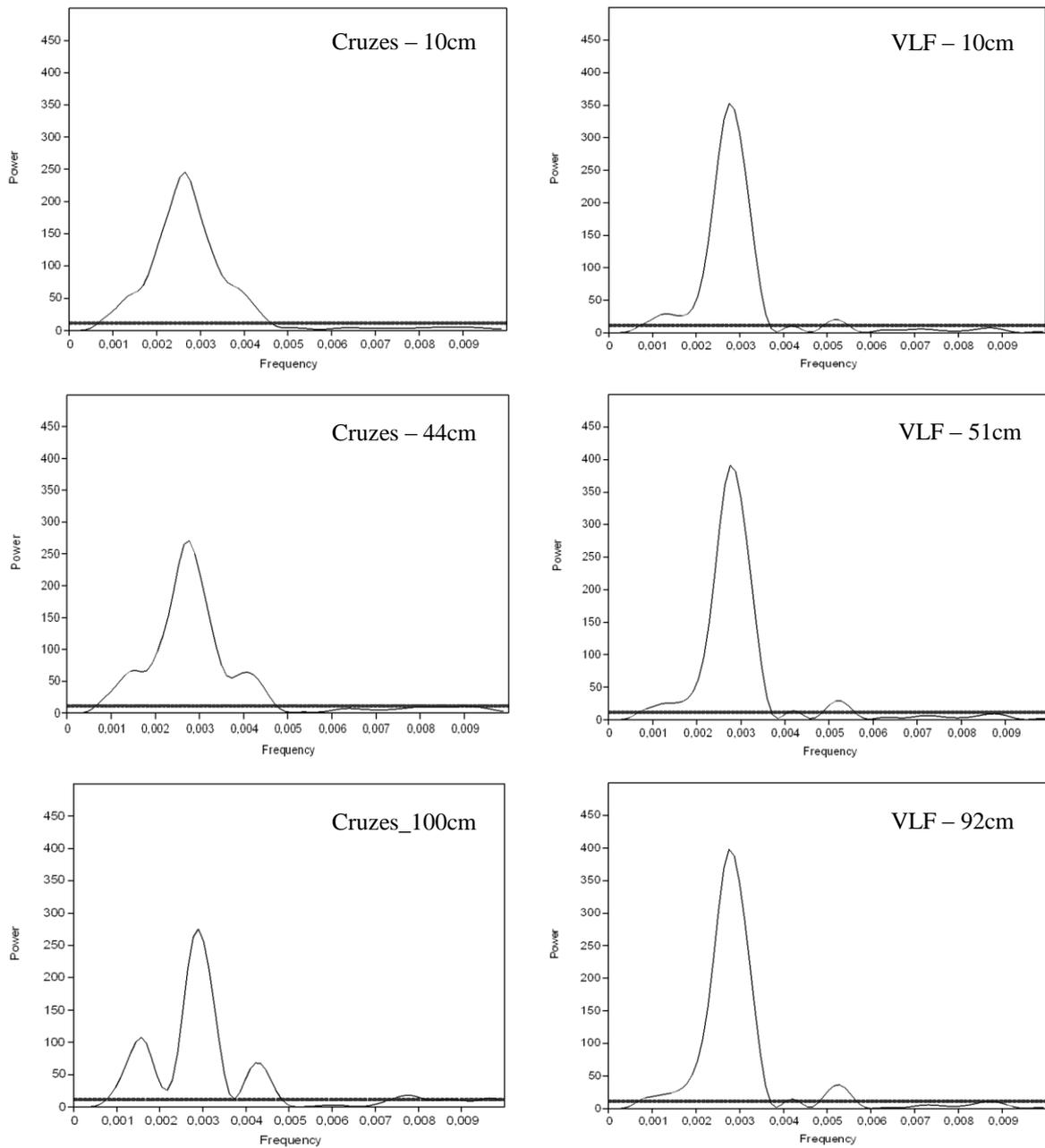


Figura 4.2 - Análise espectral da série de temperatura do solo em diferentes profundidades dos sítios de monitoramento de Keller (2008-2011).

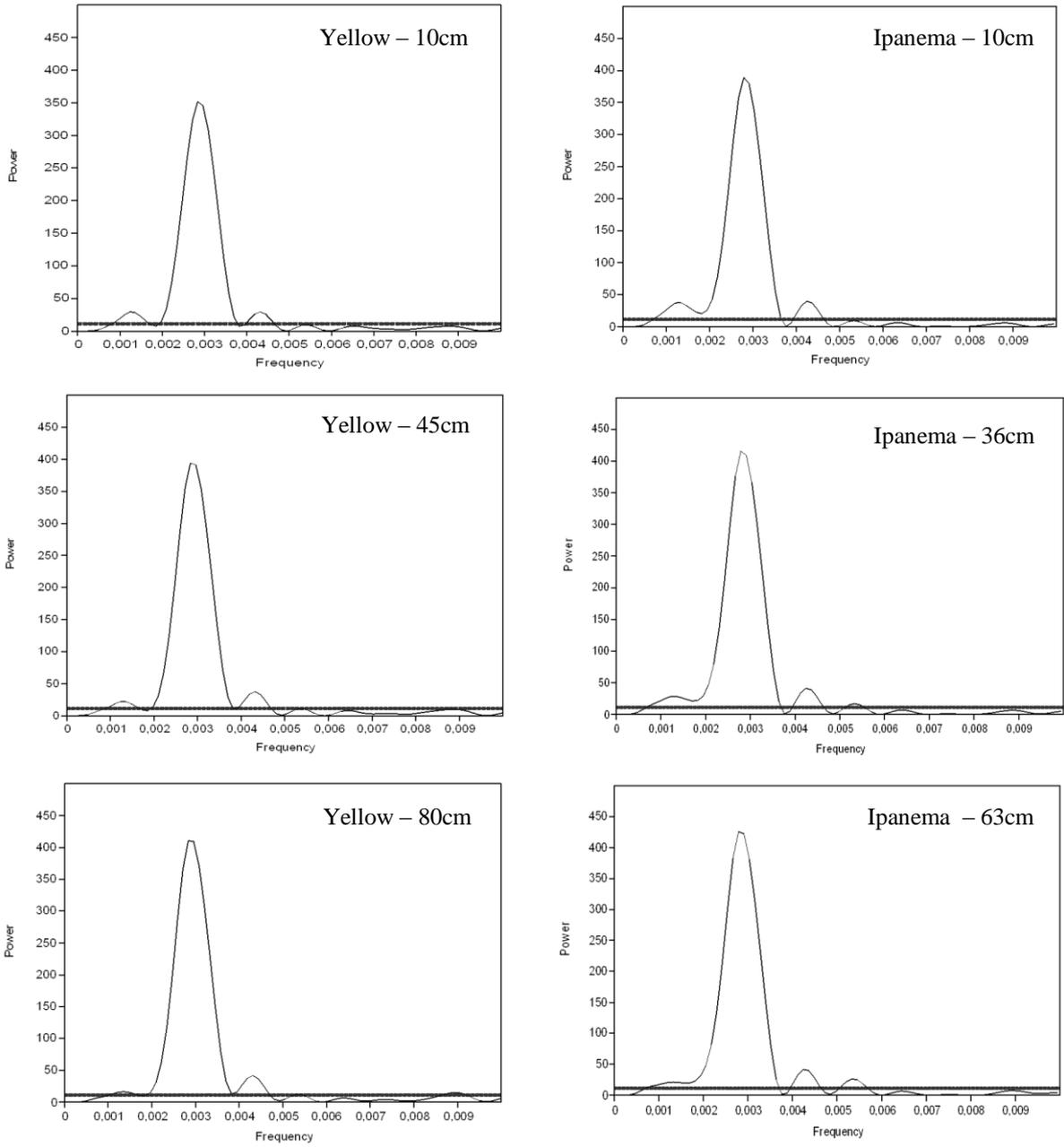


Figura 4.2 - Continuação.

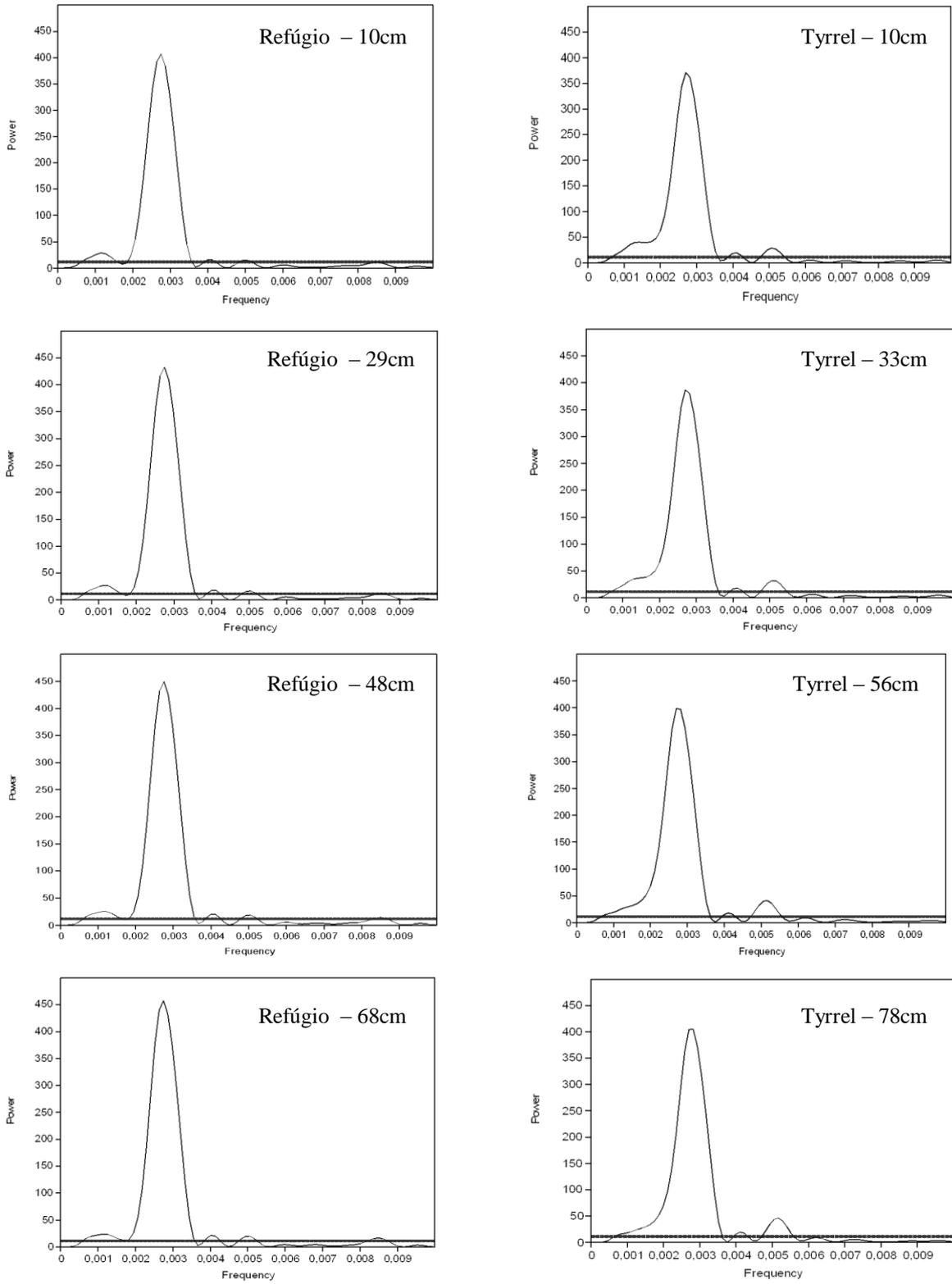


Figura 4.2 - Continuação.

Houve diminuição no índice SAM na mesma época (maio de 2009 a maio de 2010) em que a temperatura do solo mostrou-se mais baixa do que o esperado (Figura 4.3). Nesse mesmo período a estação meteorológica brasileira do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2012), localizada próxima à Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) na península Keller, registrou valores baixos para temperatura do ar e pressão atmosférica, e valores altos para velocidade do vento, com fortes rajadas, o que indicou uma possível ocorrência do SAM naquela região.

Na localidade Cruzes ocorreu o efeito de “cortina zero” (isotermal) no período do verão de 2009/2010, em que o índice SAM ficou negativo. Esse efeito é incomum nessa estação, sendo registrado em ambientes periglaciais no período do outono e inverno (HINKEL et al., 2001; RAMOS et al., 2007; GUGLIELMIN et al., 2008). Em consequência, a análise harmônica apresentou uma menor amplitude da temperatura do solo para esse perfil. Na análise harmônica (Figura 1) constatou-se que Cruzes teve temperaturas mais altas que o esperado durante o verão e, conseqüentemente, pode ter acumulado mais calor, o que ocasionou o efeito da cortina zero.

Acredita-se que o índice SAM explique em torno de 50% da variância total da temperatura da baixa atmosfera da Antártica (EVANGELISTA, 2011). Contudo, a resposta climática da região é complexa, principalmente na região da Península, e, por isso, não se pode afirmar que esse modo climático seja o principal responsável pela anomalia encontrada na temperatura dos solos de Keller, sendo necessário um período mais longo de monitoramento, contrastando com outras variáveis climáticas, para uma melhor compreensão desse fenômeno.

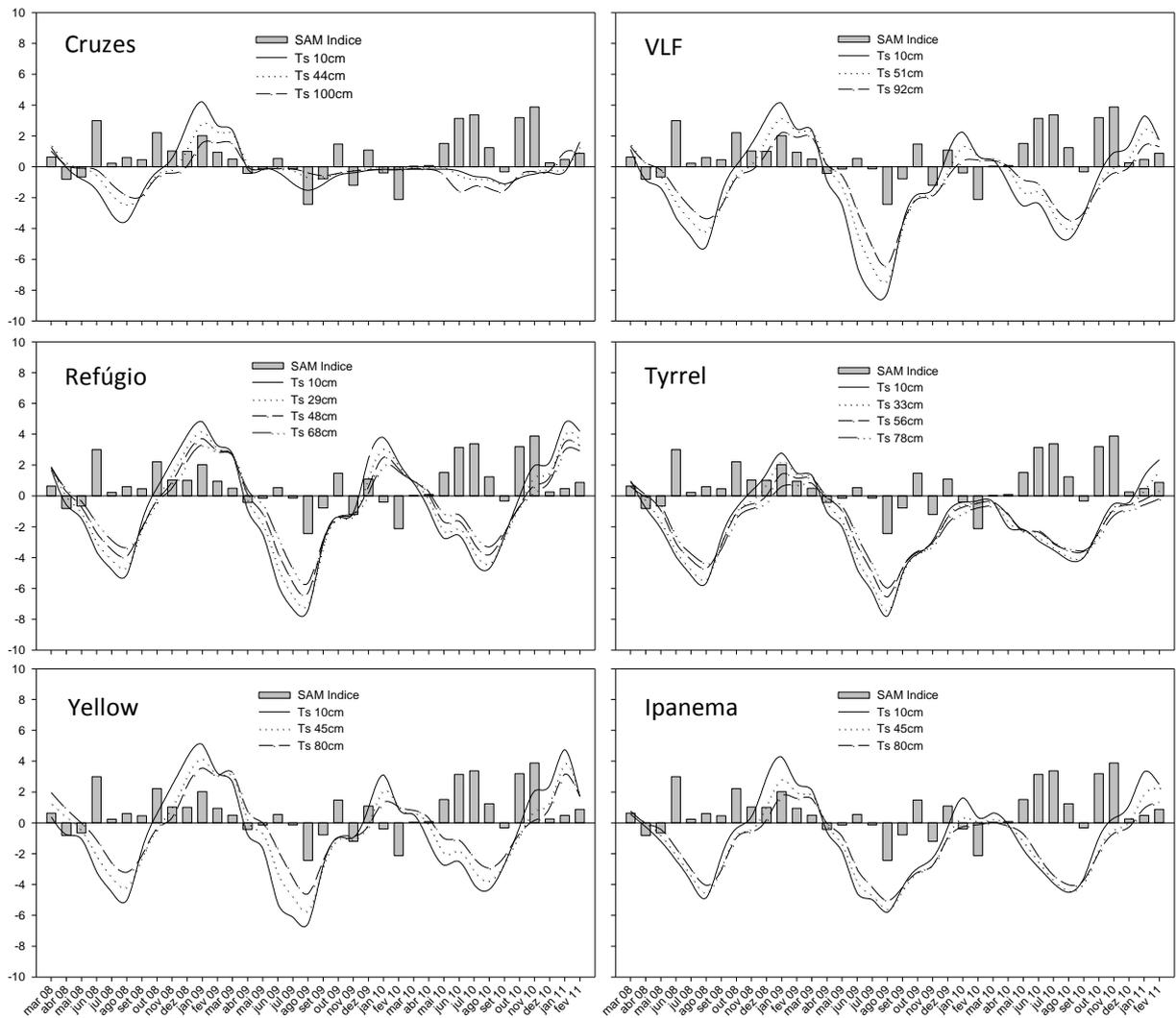


Figura 4.3 - Série de dados de temperatura do solo (Ts) dos sítios de Keller e índice SAM.

4.4 CONCLUSÕES

A análise harmônica permitiu identificar os períodos de maiores frequências como sendo o anual e o sazonal. Na análise espectral foi possível identificar além desses dois períodos um ciclo mais longo que o anual, que pode estar relacionado a um modo climático. Porém, a confirmação da influência e do tempo de resposta do solo a um modo climático só será possível num período mais longo de pesquisa.

Apesar de o período observado (três anos) ser reduzido para uma análise de série de tempo, os resultados foram satisfatórios para uma demonstração preliminar do modelo da temperatura do solo em diferentes profundidades na região estudada. Análises que tenham a finalidade de comparar o regime térmico da camada ativa com variáveis meteorológicas são recomendadas e poderão contribuir para um monitoramento ambiental da região.

4.5 REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E.H. Sensoriamento remoto da temperatura e dos fluxos de calor na superfície do reservatório de água de Itumbiara (GO). 136p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- BRAUN, M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica). Doctoral Thesis. Albert–Ludwigs–Universität Freiburg. Freiburg: 2001. 165p.
- CHATFIELD, C. The Analysis on Time Series – An Introduction. New York: Chapman & Hall, fifth edition, 1999.
- EHLERS, R.S. Análise de séries temporais. Departamento de Estatística, UFPR, 2005. Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/~ehlers/notas>. Acesso em: 21/11/2010.
- EVANGELISTA, H. A atmosfera Antártica e os sinais das mudanças globais. In: Goldemberg, J. Antártica e as mudanças globais: um desafio para a humanidade. São Paulo: Blucher, 2011. 166p.
- GUGLIELMIN, M.; ELLIS, C. J.; CANNONE, N. Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas: a case study at Signy Island (Maritime Antarctica). *Geoderma*, v. 144, p.73-85, 2008.
- HEGGER, R.; KANTZ, H; SCHREIBER, T. Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package. *Chaos an Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, v. 9, p. 413-435, 1999.
- HINKEL, K.M., PAETZOLD, F., NELSON, F.E.; BOCKHEIM, J.G. Patterns of soil temperature and moisture in the active layer and upper permafrost at Barrow, Alaska: 1993 – 1999. *Global and Planetary Change*, v. 29, p. 293-309, 2001.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto de Meteorologia Antártica. Disponível em: <http://antartica.cptec.inpe.br/>. Acesso: 21/02/2012.
- MARSHALL, G.J. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. *Journal of Climate*, v. 16, p. 4134-4143. 2003.
- MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M. Análise de Séries Temporais. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 564p.
- RAMOS, M; VIEIRA, G; GRUBER, S; BLANCO, J J; HAUCK, C; HIDALGO, M ; TOME, D; NEVES, M; TRINDADE, A. Islands, D. Permafrost and active layer monitoring in the maritime Antarctic: preliminary results from CALM sites on Livingston and Deception Islands. U.S. Geological Survey and The National Academies; USGS OF-2007-1047, Short Research Paper 070, doi:10.3133/of2007-1047.srp070. 2007.

VIEIRA, G.; BOCKHEIM, J.; GUGLIELMIN, M. et al. Thermal State of Permafrost and Active-layer Monitoring in the Antarctic: Advances During the International Polar Year 2007 – 2009. *Permafrost and Periglacial Process*, v. 21, p. 182–197, 2010.

WILKS, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2a ed. New York: Academic Press, 2006. 627p.

CONCLUSÕES GERAIS

O regime térmico da camada ativa é complexo. Influenciado por diversos fatores, demonstra a estreita relação solo-biota-atmosfera na região. O principal fator que separou os diferentes solos de Keller foi o isolamento térmico. O isolamento proporcionado pela cobertura vegetal demonstrou ser tão importante para a temperatura do solo quanto à cobertura de neve. Nos sítios com isolamento térmico, o permafrost foi encontrado até 1 metro de profundidade no solo.

A proximidade da estação Comandante Ferraz em relação a um dos sítios (Cruzes) pode ter influenciado na maior temperatura do solo encontrada nesse sítio, indicando possível efeito antrópico no permafrost. Nesse sítio, o permafrost foi encontrado a cerca de 2,1 metros de profundidade.

O ajuste do modelo para temperatura do solo foi satisfatório, e os parâmetros obtidos possibilitou a estimativa da difusividade térmica ao longo dos perfis de solo. Os principais atributos do solo que influenciaram na difusividade térmica foram matéria orgânica e textura. Os solos argilosos e os solos com maior teor de matéria orgânica apresentaram uma difusividade térmica menor.

A difusividade térmica aumentou com a profundidade e está relacionada com o conteúdo de umidade, que foi menor nos solos arenosos. Foi identificado um deslocamento na temperatura de congelamento da água no solo, sendo esse deslocamento maior nos solos com maior teor de sais em solução.

A análise de séries temporais mostrou que o período de maior frequência foi o anual. O período intra-anual (sazonalidade) também foi significativo, sendo que nos sítios onde ocorre isolamento térmico, a frequência da sazonalidade diminuiu nas camadas mais profundas do solo. Houve um período interanual com frequência significativa que pode estar associado à ocorrência do Modo Climático Anular Sul (*South Annular Mode* - SAM) na região.

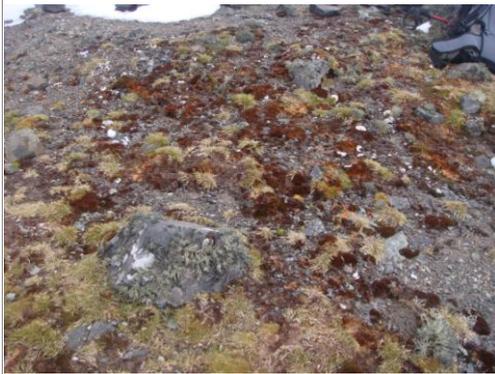
A península Keller é uma área representativa das áreas livres de gelo da Antártica, com uma diversidade de geoambientes, o que gerou resultados interessantes para o monitoramento da camada ativa e do permafrost em solos sob diferentes condições ambientais.

No entanto, recomenda-se que em estudos futuros, com a finalidade de facilitar as análises estatísticas e a comparação entre diferentes ambientes, sejam padronizadas as profundidades das instalações dos sensores de temperatura e umidade do solo para todos os sítios de monitoramento. Salienta-se também a importância de obter dados atmosféricos dos sítios, como temperatura do ar, radiação solar, umidade do ar, precipitação e deposição de neve, o que permitiria relacionar o regime térmico da camada ativa com a atmosfera.

APÊNDICE

FOTOS DOS PERFIS DE SOLOS



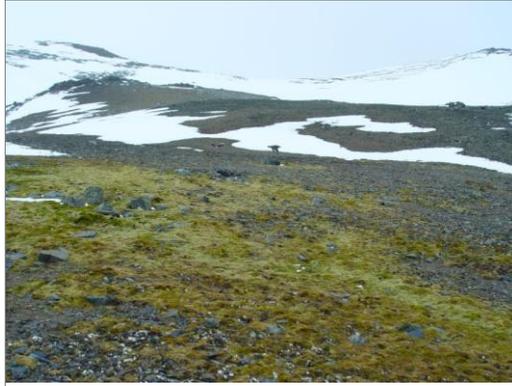


Yellow



Refúgio





Ipanema



Tyrrel

