

DOUGLAS DA SILVA LINDEMANN

**VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NO CONTINENTE ANTÁRTICO:
OBSERVAÇÕES E REANÁLISES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

L743v
2012

Lindemann, Douglas da Silva, 1985-
Variações de temperatura no Continente Antártico: observações
e reanálises / Douglas da Silva Lindemann. – Viçosa, MG, 2012.
xiii, 105f. : il. ; 29cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Climatologia - Antártica. 2. Mudanças climáticas.
3. Meteorologia. 4. Antártica. I. Universidade Federal de
Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 551.6

DOUGLAS DA SILVA LINDEMANN

**VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NO CONTINENTE ANTÁRTICO:
OBSERVAÇÕES E REANÁLISES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

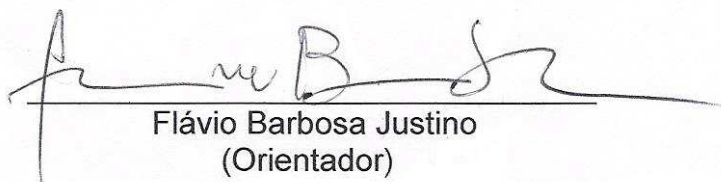
APROVADA: 13 de fevereiro de 2012.



Marcos Heil Costa



Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer



Flávio Barbosa Justino
(Orientador)

*Não importa aonde você parou...
Em que momento da vida você cansou...
O que importa é que sempre é possível e necessário "Recomeçar".
Recomeçar é dar uma chance a si mesmo...
É renovar as esperanças na vida e o mais importante...
Acreditar em você de novo.*

(Trecho do Poema "Recomeçar" de Carlos Drummond de Andrade)

AGRADECIMENTOS

Estamos tão acostumados a ficar pedindo incessantemente o que nos interessa que, em muitas ocasiões, esquecemo-nos de agradecer e de reconhecer o esforço e a dedicação das pessoas que nos cercam.

Primeiramente a Deus, pela saúde, pelo discernimento, pela fé e pelos caminhos traçados por Ele até aqui.

Aos meus pais, Gilberto e Regina Lindemann, pela educação, pelo respeito e por serem o meu grande exemplo de vida a ser seguido, a minha eterna gratidão.

À minha esposa, Marli Scherner Lindemann, pelo companheirismo, pelo amor, pela compreensão, pelo apoio e por estar sempre ao meu lado desde o início da graduação. Amo você, meu amor.

Ao meu irmão Igor Lindemann e ao meu “primo-irmão” Dionatan Müller, por sempre estarem me incentivando até nos momentos mais complicados.

Aos demais familiares que sempre estiveram comigo, pela força e pelo exemplo de que família é muito importante na vida de uma pessoa.

Ao professor Flávio Justino, pelos ensinamentos adquiridos, pelo respeito e pela oportunidade de realizar este mestrado. Além da relação professor-aluno, está uma grande amizade.

À incansável Graça, pela ajuda na resolução de dúvidas e questionamentos, sempre prestativa e atenciosa.

Aos colegas de sala que me acompanharam no primeiro ano Rose Ane e Jackson, pelos conselhos; e aos atuais, Mônica, Alex e Maurício, pelo incentivo.

Aos demais colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela ajuda e pelo apoio.

Aos amigos que adquiri até aqui que, direta ou indiretamente, me apoiaram. Afinal, o que seria da vida sem os amigos.

Ao CNPq, que é fundamental no aspecto financeiro.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1 - VARIAÇÕES DA TEMPERATURA EM SUPERFÍCIE NA ANTÁRTICA E AS LIMITAÇÕES DAS REANÁLISES PARA ALTAS LATITUDES DO HEMISFÉRIO SUL.....	7
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAIS E MÉTODOS	9
2.1. Dados de estações meteorológicas.....	9
2.2. Reanálises	13
2.3. Análise estatística	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1. Setor da Península Antártica e Shetland do Sul	19
3.1.1. Verão (DJF)	22
3.1.2. Outono (MAM)	25
3.1.3. Inverno (JJA)	27
3.1.4. Primavera (SON)	29

3.2. Setor do Oceano Índico e Mar de Weddell	31
3.2.1. Verão (DJF)	33
3.2.2. Outono (MAM)	33
3.2.3. Inverno (JJA)	36
3.2.4. Primavera (SON)	38
3.3. Setor do Oceano Pacífico	38
3.3.1. Verão (DJF)	42
3.3.2. Outono (MAM)	42
3.3.3. Inverno (JJA)	45
3.3.4. Primavera (SON)	48
3.4. Setor do Mar de Ross	50
3.4.1. Verão (DJF)	52
3.4.2. Outono (MAM)	52
3.4.3. Inverno (JJA)	54
3.4.4. Primavera (SON)	56
3.5. Setor continental	58
3.5.1. Verão (DJF)	59
3.5.2. Outono (MAM)	61
3.5.3. Inverno (JJA)	63
3.5.4. Primavera (SON)	63
4. CONCLUSÕES	65
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
6. APÊNDICES	75
6.1. Apêndice A	75
6.2. Apêndice B	76
6.3. Apêndice C	78
6.4. Apêndice D	80

6.5. Apêndice E	81
CAPÍTULO 2 - A INFLUÊNCIA DOS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA TEMPERATURA EM SUPERFÍCIE NA ANTÁRTICA	82
1. INTRODUÇÃO	82
2. MATERIAIS E MÉTODOS	84
2.1. Dados	84
2.2. Métodos de análise.....	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
3.1. Verão	88
3.2. Outono	90
3.3. Inverno.....	92
3.4. Primavera	95
4. CONCLUSÕES	98
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
CONCLUSÃO GERAL	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°	Graus
°C	Graus Celsius
α_0	Intervalo de Confiança
%	Por Cento
AAO	Oscilação Antártica
ACC	Corrente Circumpolar Antártica
ALE	Alemanha
AUS	Austrália
BRA	Brasil
<i>c</i>	Índice de Confiança
<i>d</i>	Índice de Concordância
DJF	Dezembro, Janeiro e Fevereiro
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
ERA	ECMWF Re-analyses
hPa	HectoPascal
HS	Hemisfério Sul
IGY	International Geophysical Year
IOS	Índice de Oscilação Sul
JJA	Junho, Julho e Agosto

JMA	Japan Meteorological Agency
km	Quilômetros
km ²	Quilômetros Quadrados
km ³	Quilômetros Cúbicos
lat	Latitude
lon	Longitude
m	Metros
Ma	Milhões de anos
MAM	Março, Abril e Maio
MBE	Erro do Desvio Médio
MERRA	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application
MSLP	Pressão ao Nível Médio do Mar
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Centers for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
r	Coefficiente de Correlação
r^2	Coefficiente de Determinação
READER	Reference Antarctic Data for Environmental Research
RMSE	Erro da Raiz do Quadrático Médio
RUS	Rússia
S	Sul
SAM	Southern Annular Mode
SCAR	Scientific Committee on Antarctic Research
SON	Setembro, Outubro e Novembro
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UK	Reino Unido
USA	United States of America
W	Oeste

RESUMO

LINDEMANN, Douglas da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Variações de temperatura no Continente Antártico: observações e reanálises**. Orientador: Flávio Barbosa Justino.

As regiões polares são um componente importante do sistema climático terrestre onde ocorrem variações sazonais e anuais significativas. Diante disto, o objetivo deste trabalho é analisar a variação da temperatura em superfície na Antártica e compará-las as reanálises, visando analisar a influência que os modos de variabilidade climática exercem sobre a variação da temperatura em superfície na Antártica. Os dados observados utilizados foram obtidos através do READER para o período de 1989 a 2009. Já as reanálises utilizadas foram as do NCEP/NCAR, ERA-Interim e MERRA. Com o objetivo de se ter uma análise local, o continente Antártico foi dividido em cinco setores. Após a análise por regiões da Antártica, ficou claro que o continente passou por mudanças de temperatura do ar em superfície durante o período de 1989 a 2009. As Ilhas Shetland do Sul foi a região que apresentou resultado oposto ao compararmos com o restante do continente, a tendência mudou de aquecimento para resfriamento. Outra característica importante em relação a temperatura no continente Antártico foi que durante o outono a tendência foi de aquecimento significativo na região da Antártica Oriental (setores Continental e Oceano Pacífico) e setor do Mar de Weddell, muito por influência da AAO que

apresentou correlações significativas com os dados de temperatura, principalmente na segunda década (2000-2009) onde a AAO apresentou enfraquecimento. Em termos de reanálises, percebe-se que o MERRA apresentou o melhor desempenho para a maioria das regiões. A única região que as reanálises apresentaram fraco desempenho foi no Mar de Ross. Conclui-se que ao trabalhar com modelos climáticos que levam em consideração as reanálises para região da Antártica, deve-se ter o cuidado de analisar o período de estudo e qual a região, a fim de levar em consideração mais de uma reanálise para obter melhor desempenho.

ABSTRACT

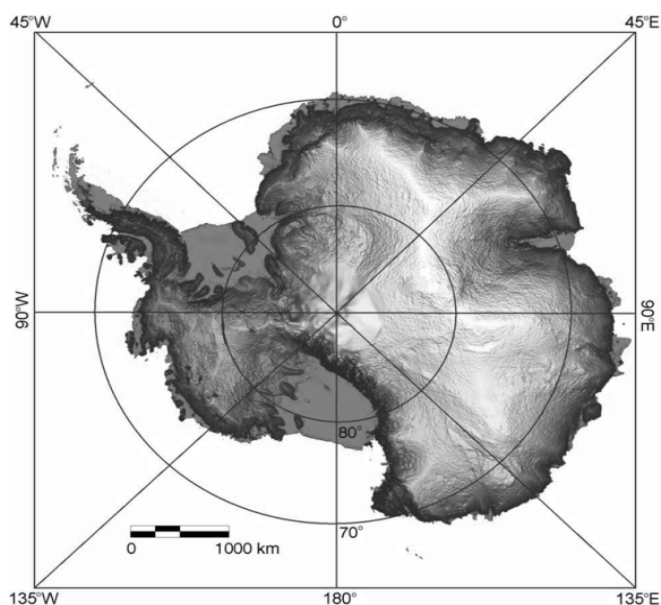
LINDEMANN, Douglas da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Temperature changes in Antarctic Continent: observartions and reanalyses**. Adviser: Flávio Barbosa Justino.

The polar regions are a very important component of Earth's climate system where significant annual and seasonal variations occur. Before this, the objective of this chapter is to analyze the variation of surface temperature in Antarctica and compare them the reanalysis, the analyze of influence that the modes of climate variability on the variation of surface temperature in Antarctica. The observed data used were obtained through READER. Already the reanalysis used were those of the NCEP/NCAR, ERA-Interim and MERRA. With the goal of having a local analysis, the Antarctic continent was divided into five sectors. After the analysis by regions of Antarctica, it became clear that the continent has undergone changes in surface air temperature during the period 1989 to 2009. South Shetland Islands was the sector that has adverse result to compare with the rest of the continent, the trend changed heating to cooling. Another important feature about the trend of temperature in the Antarctic continent was that during the autumn the trend was significant warming in the region of East Antarctica (Continental and Pacific Ocean sectors) and sector of the Weddell Sea, much influenced by the AAO that was significantly correlated with temperature data, especially in the second decade (2000-2009) where the AAO showed a weakening. In terms of reanalysis, realizes that the MERRA

presented the best performance for most regions. The only region that the reanalysis showed a weak performance was in the Ross Sea. It is concluded that when working with climate models that take into consideration the reanalysis for Antarctic region, care should be taken to examine the study period and which the region. In order to take into account more than one review for better performance.

INTRODUÇÃO GERAL

O clima da terra está fortemente ligado às condições atmosféricas e oceânicas que ocorrem em altas latitudes (BJERKNES, 1964; YUAN; MARTINSON, 2000; FYFE et al., 2007; JUSTINO; PELTIER, 2008). A Antártica afeta o clima global principalmente devido o manto de gelo continental e o seu gelo marinho circundante, que se comportam como os principais controladores da dinâmica do albedo planetário.



Fonte: Adaptado de "Antarctic Climate Change and the environment" Ano Polar Internacional 2007-2008.

Figura 1 - Área continental da Antártica.

A imensa massa de gelo permanente, com temperaturas que variam entre -30°C a -70°C no seu interior induz a formação de um centro de alta pressão sobre o continente. Em função da altitude do seu domo de gelo, com aproximadamente 4.000 m, persistentes ventos catabáticos transportam ar frio do interior do continente em direção à costa (KING; TURNER, 1997). Outras características da Antártica são muito peculiares: é o continente mais frio da Terra. A temperatura, maior no litoral e menor na região central é, de modo geral, bastante baixa: na época mais quente do ano varia de 0°C a -40°C à medida que se distancia do litoral, no inverno, a média é de -68°C no interior. Na costa, a média, no inverno, varia entre -6°C a -29°C (SETZER, 2006). Nesse sentido estudos vêm sendo conduzidos na busca de melhor entendimento do clima Antártico e seus sistemas influentes no Hemisfério Sul. Entre estes esforços está a instalação de estações automáticas para monitorar a região.

O continente Antártico é o menos conhecido entre os continentes da Terra. As primeiras observações meteorológicas foram realizadas durante as expedições no final do século XIX. Em 1903 a estação Orcadas (lat.: -60.8°S ; long.: -44.7°W) foi estabelecida nas Ilhas Orcadas do Sul, mas as condições desta estação subantártica não refletem as alterações no clima que ocorre no continente, posteriormente estabeleceu-se o registro da estação argentina Faraday (lat.: -65.3°S ; long.: -64.3°W) que começou em 1947 (RAPER et al., 1984). Os resultados das primeiras expedições na Antártica mostraram que o início do século XX foi consideravelmente mais frio do que a segunda parte do século (JONES, 1990).

Já durante o Ano Geofísico Internacional (IGY – abreviação em inglês) (1957-1959) foi observado que as temperaturas foram entre 2 e 3°C superiores em comparação com as expedições pioneiras, todavia só tornou-se possível verificar as condições climáticas e determinar a tendência nas mudanças de temperatura na Antártica somente após as instalações de estações no interior do continente, como no caso de Amundsen Scott e Byrd (1957) e Vostok (1958) (FIFIELD, 1987). O registro observacional das estações que medem a temperatura na superfície da Antártica é bastante escasso e esporádico antes da IGY (KING; TURNER, 1997), apesar dos registros das séries de Orcadas e Faraday.

A questão de saber se a Antártica como um todo tem aquecido ou resfriado nas últimas décadas tem sido considerado em inúmeros trabalhos (CARVALHO et al., 2005; JUSTINO; PELTIER, 2008; KEJNA, 2003; MARSHALL, 2002; STEIG et al., 2009; TURNER et al., 2005). Nos últimos anos muitos estudos examinaram as variações climáticas em toda a Antártica usando dados de estações meteorológicas. Jacka e Budd (1991), usando dados a partir de 1956 até a década de 1980, sugeriram que ocorreu aquecimento em torno de $0,28^{\circ}\text{C}$ por década. Eles atualizaram seu trabalho (JACKA; BUDD, 1998) para o período até 1996 e encontraram aquecimento de $0,12^{\circ}\text{C}$ por década. Raper et al. (1984) estudaram a temperatura média anual do continente Antártico com dados de estações e concluíram que ocorreu aquecimento de $0,29^{\circ}\text{C}$ por década para o período entre 1957-1982, resultado que foi significativo em nível de 5%.

É importante ressaltar que a temperatura registrada na Antártica está restrita a algumas estações. A Figura 2 apresenta a extensão territorial do continente Antártico. A quantidade de estações disponíveis com uma boa série de dados ainda é pequena e a maioria das estações está localizada na periferia do continente. As distribuições de temperatura da superfície também são diferentes de estação para estação e as tendências podem ter sinais opostos mesmo em estações adjacentes (JACKA; BUDD, 1991; SMITH et al., 1996; KARL; KNIGHT, 1994).



Fonte: Coleção Explorando o Ensino – ANTÁRTICA, volume 9, 2009.

Figura 2 - A área continental da Antártica é 1,5 vezes a área do Brasil.

Os conjuntos de dados meteorológicos podem apresentar uma série de problemas se não tratados corretamente. Por exemplo, dados de diferentes estações combinados para criar séries únicas (TURNER et al., 2005). Apesar destas limitações, esses registros *in situ* têm sido utilizado por vários pesquisadores para investigar mudanças de temperatura em todo o continente e oceano Antártico (JACKA; BUDD, 1998 e 1991; JONES, 1995; RAPER et al., 1984). É importante notar que embora apresente incertezas, estes dados vêm contribuindo significativamente para melhor compreensão dos fenômenos climáticos de pequena e grande escala, que ocorrem no continente Antártico.

Os registros de temperatura das estações da Antártica sugerem que as tendências em muitos locais são dependentes do período analisado, com alterações nos modos principais de variabilidade que afetam os dados de temperatura. Tendências de temperatura da superfície na Antártica podem ser determinadas usando diferentes formas de dados, incluindo observações *in situ*, gelo, reanálises, imagens de satélites, entre outros (KING; TURNER, 1997).

O sistema climático global é impulsionado pela radiação solar, que chega em maior quantidade nas baixas latitudes se comparado às regiões polares. Ao longo do ano, a região equatorial recebe em torno de cinco vezes mais radiação que os pólos, criando grande diferença de temperatura entre o equador e os pólos. As circulações oceânicas e atmosféricas respondem a este gradiente de temperatura horizontal com transportes de calor em direção aos pólos (TRENBERTH; CARON, 2001). Embora a dinâmica da interação oceano-atmosfera seja conhecida, as complexidades dos mecanismos de troca de calor e as interações existentes fazem das previsões sobre alterações do clima um desafio. Esta combinação entre aquecimento regional e movimento de ar criam um potencial para o desenvolvimento da célula de Hadley, onde o ar sobe na região equatorial, formando um cinturão tropical de baixa pressão e descende na região subtropical formando um cinturão de alta pressão subtropical. Em latitudes mais altas (em torno de 60°S) o ar ascende criando uma zona de baixa pressão. A diferença de pressão que se desenvolve entre a alta pressão na região subtropical e o cinturão de baixa pressão na região de 60°S, origina ventos de leste de médias latitudes que por consequência influenciam no movimento das águas da corrente circumpolar antártica (ACC).

Este ar que ascende próximo a 60°S move-se em direção a níveis superiores e desce novamente sobre a região polar, formando um centro de alta pressão sobre o continente Antártico. O gradiente gerado entre o centro de baixa pressão em 60°S e o centro de alta pressão sobre o continente origina ventos ao longo da costa da Antártica de sentido leste (HEYWOOD et al., 2004).

Nas últimas décadas, dados observados na Antártica têm mostrado que a temperatura em superfície e pressão para níveis superiores mudaram significativamente. Turner et al. (2005) encontraram forte aquecimento na Península Antártica e pequeno resfriamento sobre o interior do continente Antártico nas últimas décadas, Steig et al. (2009) atribuíram o aquecimento significativo na Antártica Ocidental a alterações regionais da circulação atmosférica.

Turner et al. (2005) encontraram correlação existente entre a queda da pressão em nível médio do mar sobre o continente Antártico e o índice positivo da Oscilação Antártica (AAO), que é o principal modo de variabilidade climática no Hemisfério Sul (HS). A AAO pode ser caracterizada como uma gangorra de pressão atmosférica entre as altas latitudes e as médias latitudes. Durante a fase positiva da AAO, anomalias de baixa (alta) pressão ocorrem sobre a Antártica (médias latitudes) (THOMPSON; WALLACE, 2000). Ultimamente, tem ocorrido tendência significativa do índice AAO para a fase positiva, que pode ser induzido por forçantes externas tais como deterioração do ozônio estratosférico (JONES; WIDMANN, 2004; THOMPSON; SOLOMON, 2002).

Além da AAO que tem forte influência na variação da temperatura em superfície no continente Antártico, existe outro modo de variabilidade climática que apesar de ocorrer em regiões equatoriais, exerce forte influência na variação da temperatura em determinadas regiões da Antártica, é o caso do El Niño-Southern Oscillation (ENSO, em inglês) ou El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Além de influenciar a temperatura do continente, o fenômeno ENOS também contribui na variação da temperatura da água do oceano, frequência de ventos meridionais e extensão de gelo marinho (SIMMONDS; JACKA, 1995).

Turner et al. (2004) estudaram a relação entre ENOS e Antártica e analisaram as anomalias de altura geopotencial em 500 hPa durante o inverno no HS. Eles constataram que em anos de El Niño (La Niña) anomalias positivas (negativas) de geopotencial são verificadas no Pacífico Sul, próximo ao

continente Antártico, causando aumento (diminuição) da temperatura média da camada sobre esta região. A AAO e o ENOS proporcionam acoplamento entre o clima Antártico e o clima equatorial. Portanto, variações no ENOS podem afetar a variação da AAO e vice-versa.

Diante do exposto, o presente trabalho é dividido em dois capítulos objetivando avaliar a variação da temperatura em superfície na Antártica e as limitações das reanálises (dados derivados) para altas latitudes no HS e a influência dos modos de variabilidade climática (AAO e ENSO) na temperatura em superfície na Antártica.

CAPÍTULO 1

VARIAÇÕES DA TEMPERATURA EM SUPERFÍCIE NA ANTÁRTICA E AS LIMITAÇÕES DAS REANÁLISES PARA ALTAS LATITUDES DO HEMISFÉRIO SUL

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos que procuram analisar a variação da temperatura em superfície na Antártica já foram desenvolvidos, e com o passar do tempo, essa região tão remota da Terra vem ganhando mais destaque, devido a sua importância desempenhada no papel de regulador térmico: Turner et al. (2005) estudando a temperatura em superfície para analisar a tendência durante o período de 1951-2000 constataram que das 19 estações estudadas, 11 tinham tendências de aquecimento e apenas 7 de resfriamento. Outro estudo que analisou a tendência da temperatura em superfície na Antártica foi realizado por Jones (1995), onde foram considerados os registros de temperatura de 16 estações de 1957-1994 e encontrou-se aumento de $0,57^{\circ}\text{C}$ ao longo deste período. Outros estudos semelhantes foram realizados por outros autores (JACKA; BUDD, 1998; DORAN et al., 2002; TURNER et al., 2002).

Segundo Comiso (2000), onde o autor dividiu o seu estudo em duas partes, a primeira parte abrange um período de 45 anos entre 1954-1998, e utilizando 21 estações, a tendência média é de $0,012^{\circ}\text{C}$ por ano, com 17 estações com tendências de aquecimento e apenas 4 com tendências de

resfriamento. Por outro lado, a segunda parte, utilizando um período de 20 anos (1979-1998) a tendência média foi de $-0,008^{\circ}\text{C}$ por ano, com 9 estações com tendências de aquecimento e 12 estações com tendências de resfriamento. Apesar do aparente aumento de temperaturas globais durante os últimos 20 anos, a região do continente da Antártica em geral mostra resfriamento durante o período.

Outros estudos realizados (KEJNA, 2003; JACKA; BUDD, 1998; VAN DEN BROEKE, 2000) apresentam que apesar das mudanças climáticas que ocorrem nos últimos 20 anos, existe enfraquecimento da taxa de aquecimento da Península Antártica e resfriamento na Antártica Oriental. Devido a essa grande diferenciação regional que ocorre ainda não se pode afirmar em qual direção continuará as variações de temperatura do ar em superfície na Antártica.

Embora a Península Antártica seja um dos locais de maior e mais rápido aquecimento da Terra, estações localizadas no continente Antártico geralmente mostram tendências insignificantes nas recentes décadas (TURNER et al., 2005). No entanto, os registros mais longos e contínuos de estações meteorológicas estão localizados na região costeira da Antártica, cedendo pouca informação sobre as condições no interior do continente. Nos últimos anos, dados de reanálises ganharam grande importância e começaram a ser utilizados por terem boa representação das variações climáticas de determinados locais, desde a época pré-satélite até os dias atuais (STEIG et al., 2009).

Nas regiões polares, é difícil de avaliar o clima atual e suas perspectivas de tendências climatológicas em longo prazo, principalmente porque os registros meteorológicos nessas áreas são espacialmente dispersos e de curta duração se comparados com outras regiões do globo. A baixa densidade espacial dos dados meteorológicos polares torna difícil separar as alterações locais de variações regionais ou mesmo de escala continental, especialmente na Antártica (BROMWICH et al., 2007). Bromwich e Fogt (2004) relataram significativa melhora das reanálises na região Antártica com o advento dos satélites meteorológicos a partir do final da década de 1970, embora a correlação entre as reanálises tenha melhorado, ainda existem significativas diferenças principalmente no inverno. Uma provável

consequência de esquemas distintos de assimilação de dados e da diminuição de dados de estações nestes períodos de inverno podem ser as causas destas discrepâncias (SETZER; KAYANO, 2009).

A análise do clima em altas latitudes no HS está limitada a rede de estações meteorológicas dispersas. Diante deste problema centros de pesquisas desenvolveram métodos de assimilação de dados para melhorar a qualidade dos resultados e resolver o problema de “vazios” em determinadas regiões do globo (KISTLER et al., 2001; KALNAY et al., 1996). Neste sentido, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de analisar a variação da temperatura em superfície na Antártica e analisar a representação desta temperatura em superfície através de diferentes centros de reanálises disponíveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados de estações meteorológicas

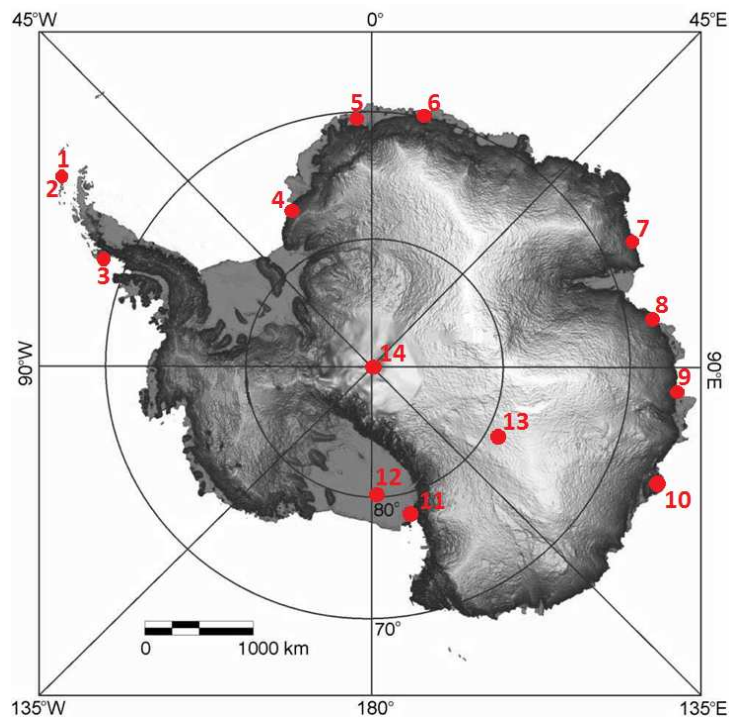
É complexo montar um conjunto de dados homogêneos de observações e médias climatológicas na Antártica. Isto porque diferentes metodologias de medição foram feitas ao longo dos anos. O fato é que partes dos primeiros dados foram perdidas e existe alguma dificuldade de localizar outras partes dos dados meteorológicos. Assim, o Reference Antarctic Data for Environmental Research (READER), que foi estabelecido pelo Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), tem como objetivo criar um conjunto de dados de alta qualidade, com medições de longo e médio prazo em superfície na Antártica. Sua principal fonte de dados são as estações automáticas instaladas no continente (TURNER et al., 2004).

O READER possui um novo e melhorado conjunto de dados climáticos da Antártica que podem ser usados para estudos de variações naturais e mudanças climáticas, essas e outras informações podem ser acessadas por meio do site <http://www.antarctica.ac.uk/met/READER> (acessado em abril de 2011). Para ter melhor representação da temperatura em superfície da Antártica foram utilizados dados diários de temperatura de 14 estações (Tabela 1) para o período de dezembro de 1988 até dezembro de 2009, distribuídas

pela região costeira e central do continente (Figura 3). Por meio desta série com dados diários foi estabelecida uma nova série com dados mensais. Com esse processo concluído, foi possível observar a variação da temperatura em superfície e a sua tendência. Para compreensão mais detalhada da variação da temperatura, o continente Antártico foi dividido em cinco regiões e analisado separadamente (Setor da Península Antártica e Shetland do Sul, Setor do Oceano Índico, Setor do Oceano Pacífico, Setor do Mar de Ross e Setor Continental), como pode ser observado na Figura 4.

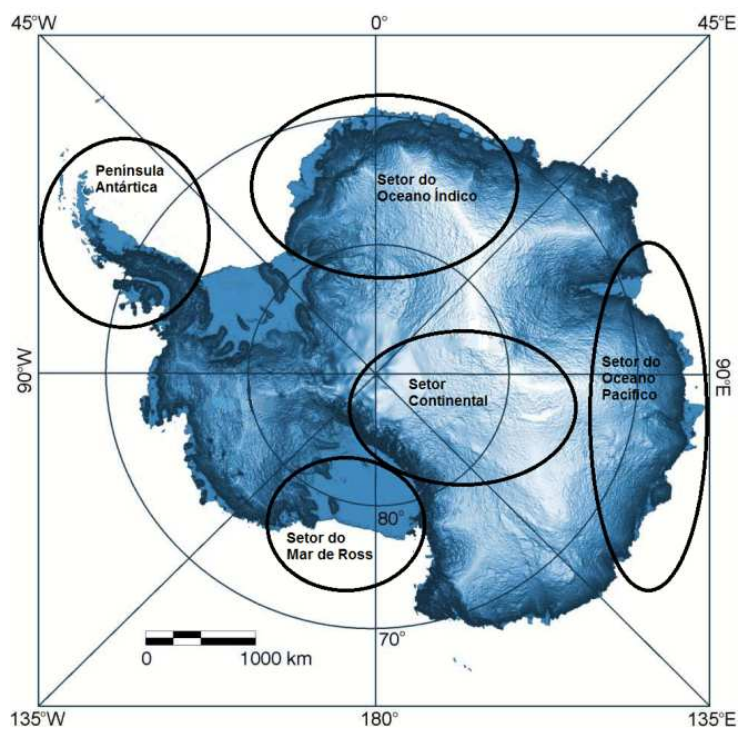
Tabela 1 - Estações utilizadas no estudo, com a sua posição, elevação e os países as quais pertencem

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevação (m)	País
1 Bellingshausen	-62.2	-58.9	15	RUS
2 Ferraz	-62.1	-58.4	20	BRA
3 Rothera	-67.5	-68.1	32	UK
4 Halley	-75.5	-26.7	30	UK
5 Neumayer	-70.7	-8.4	50	ALE
6 Novolazarevskaya	-70.8	11.8	119	RUS
7 Mawson	-67.6	62.9	16	AUS
8 Davis	-68.6	78.0	13	AUS
9 Mirny	-66.6	93.0	40	RUS
10 Casey	-66.3	110.5	42	AUS
11 McMurdo	-77.9	166.7	24	USA
12 Marble Point	-77.4	163.7	108	USA
13 Dome C	-75.1	123.4	3280	USA
14 Amundsen Scott	-90.0	0.0	2835	USA



Fonte: Adaptado de “Antarctic Climate Change and the Environment”. Ano Polar Internacional 2007-2008.

Figura 3 - Localização das estações automáticas.



Fonte: Adaptado de “Antarctic Climate Change and the Environment” - Ano Polar Internacional 2007-2008.

Figura 4 - Divisão do continente antártico em cinco setores.

O manto de gelo da Antártica já existe há aproximadamente 35 Ma, com flutuações consideráveis, é considerado uma das principais forças para alterações no nível do mar global e clima durante todo o Cenozóico (em torno de 65 Ma). Determinar a escala e a velocidade da resposta das grandes massas de gelo, associado com o gelo marinho em relação as forçantes climáticas é de vital importância porque variações do volume de gelo conduzem principalmente a: (1) mudança global do nível do mar e (2) alterações no albedo planetário. Apesar da sua posição, a Antártica já permaneceu na maior parte do seu território livre de gelo, com vegetação e com temperaturas anuais acima do ponto de congelamento, até a última metade do Cenozóico (cerca de 34 Ma). Após este período o continente tornou-se sujeito a repetidas fases de glaciação com certa variação de escala temporal e espacial (FLORINDO; SIEGERT, 2009).

O continente Antártico e o seu oceano circundante têm sido alvo de numerosas expedições científicas e vários projetos de perfuração, esses esforços levaram a significantes avanços na compreensão da evolução do clima, biota do continente e global durante o Cenozóico. Os registros oceanográficos documentam claramente o longo prazo de resfriamento do clima ao longo dos últimos 50 Ma e a variabilidade em grande escala nos últimos 3 a 5 milhões de anos. Eles também mostram os eventos que são abruptos ou breves, e os que são marcados por mudança distinta na taxa das variações de longo prazo. A explicação para esses eventos incluem alterações nas concentrações de gases atmosféricos, alterações na circulação oceânica, picos das forçantes orbitais, interações com glaciações do hemisfério norte entre outros (FLORINDO; SIEGERT, 2009). Desta forma o estudo das variações recentes e futuras do clima da Antártica é fundamental para chegar a conclusões de que se essas variações são cíclicas ou se as ações de forçantes externas exercem papel importante.

Como mencionado anteriormente, nas regiões polares é difícil de estudar o clima atual e tendências climatológicas em longo prazo, justamente porque os registros meteorológicos nessa região são dispersos e com período curto se comparado com outras regiões do globo. A baixa densidade espacial dos dados meteorológicos polares torna difícil a separação de alterações locais de variações regionais ou mesmo em escala continental (BROMWICH et al.,

2007). Para ajudar a resolver esse problema de registros meteorológicos descontínuos e espacialmente incompletos, reanálises globais foram desenvolvidas.

2.2. Reanálises

Um requisito necessário para as aplicações dos dados de clima das reanálises é a representação mais exata possível da variabilidade em diferentes escalas de tempo, considerando, por exemplo, a capacidade de estimar tendências. Um dos objetivos das reanálises é produzir registro homogêneo da evolução atmosférica desde o clima passado, presente e servir de base para projeções de clima futuro. No entanto, a representação do clima de uma região por parte das reanálises é inevitavelmente afetada por alterações no sistema de observação e pela presença de modificações em modelos. Trabalhar as variáveis que compõem a atmosfera, tais como temperatura média, exigem estimativas dos indicadores de mudanças do clima, portanto, devem sempre envolver modelagem estatística e isso requer invariavelmente algum tipo de extrapolação de informações e medições incertas (DEE et al., 2011).

Um conjunto de dados gerados por reanálise pode ser de grande valor para pesquisas atmosféricas. Dados de reanálises fornecem multivariáveis que são espacialmente completas e com consideráveis registros da circulação atmosférica global. Sucessivas gerações de reanálises atmosféricas foram apresentadas em diversos institutos e melhoraram na qualidade como resultado de modelos melhores, melhores métodos de entrada de dados e conseqüentemente melhores métodos de assimilação. Entre os principais institutos de reanálises globais podemos citar: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (KALNAY et al., 1996), Japan Meteorological Agency (JMA) (ONOGI et al., 2007), National Aeronautics and Space Administration (NASA) (SCHUBERT et al., 1993; RIENECKER et al., 2011) e o European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (UPPALA et al., 2005). As reanálises geraram crescente variedade de produtos de dados úteis, longos períodos de tempo, além do aumento na resolução espacial e temporal.

A primeira reanálise global criada foi proposta pela NASA, cobrindo o período de 1979-1993 (SCHUBERT et al., 1993). No entanto, esta reanálise não recebeu muita atenção e também não foi muito utilizada. Logo após o seu lançamento, o National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e o National Centers for Atmospheric Research (NCAR) uniram-se para produzir a reanálise global NCEP/NCAR (NCEP1), quando foi lançado o NCEP1 que, originalmente, abrangeu o período de 1948 a 1997 (KALNAY et al., 1996; KISTLER et al., 2001). O período maior de tempo do NCEP1, em comparação com a reanálise do NASA, é a principal razão por que o NCEP1 tem recebido muito mais atenção e tenha sido mais utilizado (BROMWICH et al., 2007). Desde o lançamento do NCEP1, outras reanálises globais foram produzidas e disponibilizadas, o NCEP2 que abrange o período de 1979 até o presente (KANAMITSU et al., 2002). O ECMWF com o ERA-15, ERA-40 e o mais recente ERA-Interim, abrangendo os períodos de 15 anos (1979-1993), 40 anos (setembro de 1957 a agosto de 2002) e com reanálises mais recentes como o caso do ERA-Interim (GIBSON et al., 1997; UPPALA et al., 2005).

O estudo aqui apresentado utiliza três conjuntos de reanálises, a saber: o ERA-Interim, o NCEP-NCAR e o MERRA. O ERA-Interim é a mais recente reanálise atmosférica global produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Abrange o período que inicia em 01 de janeiro de 1989 e continua até os dias atuais, praticamente em tempo real. Uma extensão deste conjunto de dados que abrange o período de 1979 a 1989 está em fase de preparação. Os produtos gerados por este conjunto incluem grande variedade de parâmetros de superfície a cada três horários, como por exemplo, as condições oceânicas e de superfície. Outros parâmetros estão disponíveis a cada seis horas, como as informações de ar superior (troposfera e atmosfera) (DEE et al., 2011; BERRISFORD et al., 2009).

Este conjunto de reanálise foi desenvolvido para abordar várias dificuldades em problemas de assimilação de dados encontrados durante a produção do ERA-40 (UPPALA et al., 2005). Estes problemas estão relacionados principalmente na representação do ciclo hidrológico, na qualidade da circulação atmosférica. Esta última questão está inserida em outro objetivo principal do ERA-Interim, que é melhorar o aspecto técnico da reanálise, como a seleção dos dados, controle de qualidade. Cada um destes

detalhes pode ter grande impacto na qualidade dos produtos da reanálise (DEE et al., 2011). Para o ERA-Interim, a resolução espectral do loop externo é T255 (~79 km) e dois sucessivos loops internos com resoluções de T95 (~210 km) e T159 (~125 km) (TRÉMOLET, 2004).

O projeto de reanálises do National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) começou em 1991 como consequência de um projeto do NCEP para sistemas de assimilação de dados. A ideia básica do projeto de reanálise é usar sistemas de análise de variáveis meteorológicas e realizar a assimilação de dados usando dados passados (a partir de 1957) até o presente. Além disso, o mesmo sistema será usado para continuar a executar dados para o futuro (KALNAY et al., 1996).

O sistema de reanálise do NCEP-NCAR possui três módulos principais: decodificação dos dados, controle de qualidade dos dados no pré-processamento e módulo de assimilação com sistema de controle automático e arquivamento do módulo. O módulo central é a assimilação de dados, que tem as seguintes características: resolução central de T62 (~210 km) com 28 níveis verticais (KISTLER et al., 2001).

O Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application (MERRA) é uma reanálise da era pós-satélite (1979 até o presente), Rienecker et al. (2008) descrevem minuciosamente os modelos numéricos e assimilação de dados utilizados, enquanto Bosilovich et al. (2011) descrevem o projeto MERRA. Este projeto foi desenvolvido pelo reconhecimento de que vários aspectos do ciclo hidrológico não estavam bem representados por gerações de reanálises anteriores. O MERRA procurou aperfeiçoar o ciclo hidrológico como um todo, para servir de contribuição para o meio científico e colaborar para os dados de reanálises já existentes (RIENECKER et al., 2011).

O modelo de circulação geral da atmosfera utilizado pelo MERRA é baseado em processos dinâmicos atmosféricos, que apresentam grande eficiência em demonstrar o transporte em altos níveis, incluindo até o processo de formação de nuvens (BACMEISTER et al., 2006). A superfície terrestre é modelada por uma grade que possui 0,5° de latitude, com 0,67° de longitude. Na vertical, o MERRA possui 72 níveis desde a superfície até 0,01 hPa (REINECKER et al., 2011).

2.3. Análise estatística

Para identificar possíveis tendências nas séries de temperatura e reanálises, foi utilizado o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, uma vez que o teste considera a hipótese de estabilidade da série temporal, onde a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma, admitindo a hipótese nula “Ho”, ausência de tendência. A hipótese nula é rejeitada quando o valor calculado para “Z” ultrapassa o valor crítico tabelado a intervalo de confiança $\alpha_0 = 1,96$ e $\alpha_0 = 2,58$ para intervalo de significância $\alpha_0 = 5\%$ e $\alpha_0 = 1\%$, respectivamente, os quais foram adotados neste estudo. Considerando-se α_0 positivo (negativo) como indicação de tendência para aumento (diminuição) da série.

Para analisar o desempenho das reanálises em relação aos dados observados nas estações e verificar possíveis erros, testes estatísticos foram utilizados na comparação das estimativas das reanálises: coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) (WILLMOTT et al., 1985), índice de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), erro da raiz do quadrático médio (RMSE) (LOAGUE; GREEN, 1991) e erro do desvio médio (MBE) (Tabela 2).

Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados de acordo com Hopkins (2009), conforme a Tabela 3. O coeficiente de determinação (r^2) será aplicado para verificar a relação das reanálises e dados observados na região de estudo. Através do (r^2) será possível avaliar o quanto a variação da temperatura é explicada pelas reanálises.

Aplicou-se também o índice de concordância (d), que possui variação entre 0 e 1 e indica o grau de exatidão entre valores estimados (reanálises) e observados, quanto mais próximo de 1, melhor a exatidão das reanálises em relação a variável observada.

Tabela 2 - Testes utilizados na comparação das estimativas do modelo

Teste	Equação
Coeficiente de correlação	$r_{P_i, O_i} = \frac{Cov(P_i, O_i)}{S_{P_i} \cdot S_{O_i}}$
Índice de concordância	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i + O_i)^2} \right]$
Índice de confiança	$c = r * d$
Erro da raiz do quadrático médio	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$
Erro de desvio médio	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i$

em que, N é o número de observações, Pi é o valor estimado, Oi é o valor observado, P'i = Pi – M e O'i = Oi – M, sendo M a média da variável observada.

Tabela 3 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação “r”	Correlação
0,0 – 0,1	Muito Baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito Alta
0,9 – 1,0	Quase perfeita

Para interpretar o desempenho das reanálises, foi adotado o índice (c), em que $c = 0$ indica confiança nula, enquanto $c = 1$ indica confiança perfeita (Tabela 4). O valor do erro da raiz do quadrático médio (RMSE) de um conjunto de valores de reanálises é indicação do quanto esses valores variam em relação aos valores observados. O RMSE tem sempre valor positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados.

Tabela 4 - Valores dos coeficientes de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
< 0,30	Péssimo

O valor do erro de desvio médio (MBE) de um conjunto de valores de reanálises é indicação do desvio médio desses valores. Valores baixos para MBE são esperados, valores positivos indicam superestimação das reanálises e vice-versa em relação aos dados observados. Uma desvantagem deste teste é que uma superestimação de uma medida irá cancelar uma possível subestimação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tendências das temperaturas na Antártica são muito variáveis em todo o continente, por exemplo, na mesma época que ocorre rápido aquecimento na Península Antártica, que se caracteriza como uma região de rápida mudança na tendência da temperatura (TURNER et al., 2005), pode-se

observar outros tipos de variações em outros setores do continente. Frente a essas diferentes variações na tendência da temperatura na superfície da Antártica, dividiu-se o continente por setores, o primeiro a ser analisado será a Península Antártica e Shetland do Sul.

3.1. Setor da Península Antártica e Shetland do Sul

A Península Antártica está localizada entre 63° e 75°S, sendo uma faixa de terra montanhosa com largura média de 70 km, além de suas ilhas adjacentes, é composta por um platô interno com elevação média de 1.500 m. A Península representa cerca de 3,7% da área do continente Antártico. Funciona como uma barreira à circulação atmosférica regional, provocando marcada distinção climática de um lado e de outro da Península (FERRON, 1999).

No lado leste, localiza-se o Mar de Weddell, região que se caracteriza por ser mais fria, em virtude da intervenção de ar frio oriundo do interior continental Antártico. Os ventos persistentes de leste na região costeira empurram este ar frio contra a barreira montanhosa da Península, que fica comprimido devido à forte inversão térmica. A massa de ar frio não consegue ascender e, portanto deflete para o norte/nordeste, onde estão localizadas duas das estações em análise (Ferraz e Bellingshausen) nas Ilhas Shetland do Sul (SCHWERDTFEGER; AMATURO, 1979).

Na costa oeste, de acordo com Ferron et al. (2004), os ventos são predominantemente de norte e nordeste, logo, é a região mais temperada e úmida de toda a Antártica, porque tais ventos carregam o ar que é relativamente úmido do oceano Pacífico para o Mar de Bellingshausen. Neste setor está localizada a outra estação do estudo, Rothera.

De acordo com Turner et al. (2005), a Península Antártica, excetuando as Ilhas Shetland do Sul, tem experimentado tendência de aquecimento durante o período de 1950 a 2000, com temperatura na estação de Faraday/Vernasky com taxa de aumento de 0,56°C por década e 1,09°C no inverno por década. Cerca de 300 km ao sul de Faraday, na estação de Rothera, ocorre tendência de aquecimento ainda maior, mas a falta de registros longos e a grande variabilidade das temperaturas indicam que a tendência não

é significativa estatisticamente. Ainda segundo os autores, a região de aquecimento está limitada na região ocidental da Península, desde a parte sul e vai diminuindo em direção as Ilhas Shetland do Sul.

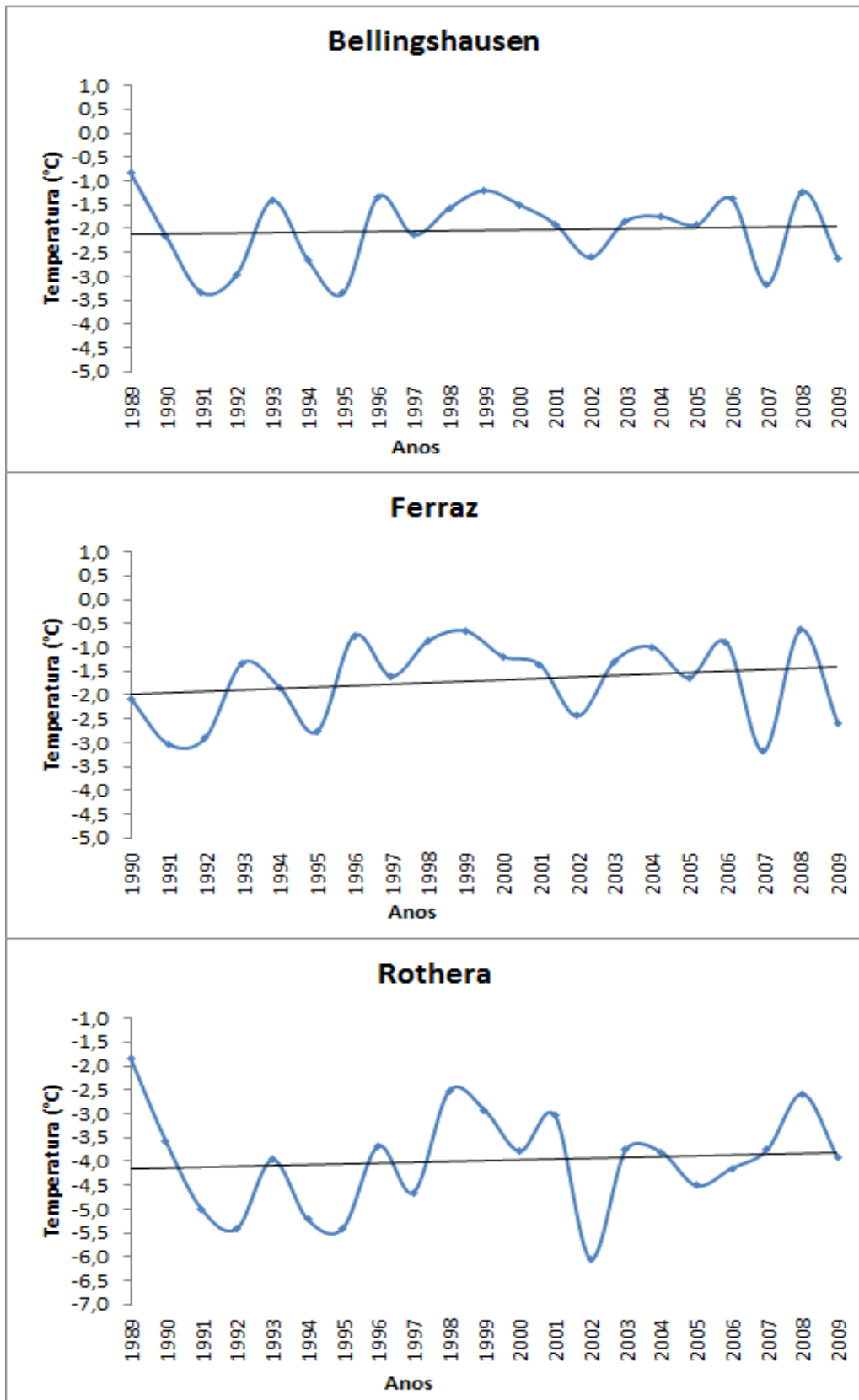
Estudos distintos encontram a mesma tendência de aquecimento para a região oeste da Península Antártica (STEIG et al., 2009; SHUMAN; STEARNS, 2001; TURNER et al., 2005; MARSHALL et al., 2006), como indicado na Figura 5 pela estação Rothera, ainda observa-se pela Tabela 5, que a tendência de aquecimento ocorreu para todo o período em análise. Kejna (2003) observou aumento significativo da temperatura em superfície na estação de Rothera, principalmente a partir da década de 80, durante o período de 1996 a 2000 a tendência de aquecimento foi de 1,4°C. Pela Tabela 5, a tendência de aquecimento para o setor oeste da Península permanece até o ano de 2009.

Enquanto o setor oeste da Península Antártica permanece com tendência de aquecimento, a surpresa ficou por parte das estações localizadas nas Ilhas Shetland do Sul, apesar de tanto a estação russa Bellingshausen, quanto a estação brasileira Ferraz apresentarem pequena tendência de aquecimento para o período todo (Tabela 5), foi observado que a tendência a partir do ano 2000 é de resfriamento nesta região.

Setzer e Romão (2008) já haviam notado esse resfriamento na última década na estação Ferraz, para o período entre 1998-2007 os autores encontraram queda significativa na temperatura de 0,73°C/década. O período que é analisado deve ser levado em consideração, pois dependendo da época, resultados bastante adversos podem ser encontrados, por exemplo, Marshall et al. (2006) analisaram 60 anos de dados (1946-2006) para a região da Península Antártica, e encontraram tendência de aquecimento de 0,41°C/década para a região leste da Península. De acordo com os autores, essa tendência de aumento da temperatura foi associada a aumento nos ventos que ocorreram por causa da AAO que mudou de fase. Ventos mais fortes acabam trazendo massas de ar relativamente mais quentes e de origem marítima.

Após analisar a tendência da temperatura em superfície na Antártica para o período como um todo, para melhor compreensão da variação da

temperatura em superfície e também análise do desempenho das reanálises para esta região, os dados das estações foram divididos por períodos sazonais.



Nota: Os gráficos estão em escala diferentes, para melhor visualização.

Figura 5 - Variação média anual da temperatura do ar (°C) em superfície entre 1989 a 2009 para as estações no setor da Península Antártica e Shetland do Sul e tendência linear das séries.

Tabela 5 - Análise de significância da tendência anual e sazonal da temperatura do ar (°C) para as estações da Península Antártica e Shetland do Sul

Estação	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Bellingshausen	0,33	-0,33	1,48	-0,24	0,03
Ferraz	1,49	1,27	1,29	-0,64	-0,29
Rothera	0,24	-0,75	1,11	0,18	0,51

3.1.1. Verão (DJF)

O verão tem início em dezembro e vai até fevereiro, sendo caracterizado por pequena variação da temperatura em superfície, de acordo com Kejna (2003) as temperaturas do verão tem menos influência no resultado final na tendência anual de temperatura. Chapman e Walsh (2007) afirmam que é durante o verão que ocorre menor número de depressões e outros sistemas sinóticos que atuam na região circumpolar e também encontraram pequenas variações da temperatura para um período de 45 anos (1958-2002).

Por meio da Tabela 5, observa-se que para a estação Rothera, o verão foi o único período do ano que a estação apresentou pequena tendência de resfriamento, Bellingshausen também apresentou pequena tendência de resfriamento, Ferraz apresentou leve tendência de aquecimento, mas as tendências das três estações não foram significativas, apesar das pequenas tendências apresentadas, a região da Península e Shetland do Sul devem ser analisadas com cuidado, pois qualquer aumento pouco mais significativo da temperatura do ar pode implicar em derretimento do gelo continental, visto que as temperaturas nestas regiões estão muito próximas do ponto de equilíbrio entre sólido-líquido [no caso do verão é fusão (sólido para líquido)]. Assim, um possível aumento significativo da temperatura do ar em superfície nesta região pode acelerar o processo de degelo do gelo continental que ocorre

normalmente durante o verão, o que poderia trazer consequências muito graves para a região, como implicações ecológicas e possível aumento do nível do mar, caso esse derretimento fosse muito acentuado.

Ao observar a Figura 6, verifica-se que a variação da temperatura para as três estações durante o verão é muito pequena. Apesar desta pequena variação, ao realizar uma correlação entre os dados das reanálises com os dados observados, os resultados não foram muito significativos. De acordo com a Tabela 6, para as estações das Shetland do Sul as reanálises do NCEP/NCAR e do ERA-Interim apresentaram de forma geral o melhor desempenho. O NCEP/NCAR obteve coeficiente de correlação de moderado a alto e os índices de concordância *d* e confiança *c* entre mediano e bom. O ERA-Interim apresentou desempenho um pouco inferior para estas estações. Para Rothera as reanálises obtiveram índices muito abaixo do esperado, o ERA-Interim foi o que apresentou os melhores índices, mas mesmo assim o desempenho do índice de confiança foi insatisfatório, o índice de concordância (*d*) também foi baixo, apenas a correlação foi considerada alta, apesar do coeficiente de determinação (r^2) tenha sido baixo. O MERRA obteve índices muito baixos para a região da Península Antártica e Shetland do Sul.

Para a região da Península e Shetland do Sul não devem ser esperadas diferenças significativas entre os valores de temperatura nas estações e os pontos de grade mais próximos das reanálises. Isto porque os algoritmos de interpolações devem manter os valores das estações em suas localizações geográficas (SETZER; KAYANO, 2009). Possíveis respostas para pior representação das reanálises para Rothera podem estar associadas a influência dos modos de variabilidade climática e do gelo marinho nesta região, o que dificulta um pouco mais o desempenho das reanálises (TURNER et al., 2005; STEIG et al., 2009).

É importante ressaltar que apenas uma tabela será disponibilizada no corpo do texto, no caso da Península Antártica e Shetland do Sul apenas a Tabela 6 (verão), as outras tabelas referentes às demais estações (outono, inverno e primavera) estarão disponíveis no apêndice deste trabalho. O mesmo raciocínio será empregado para os outros setores do continente Antártico (Mar de Weddell/Oceano Índico, Oceano Pacífico, Continental e Mar de Ross), com a finalidade de tornar a leitura mais prática.

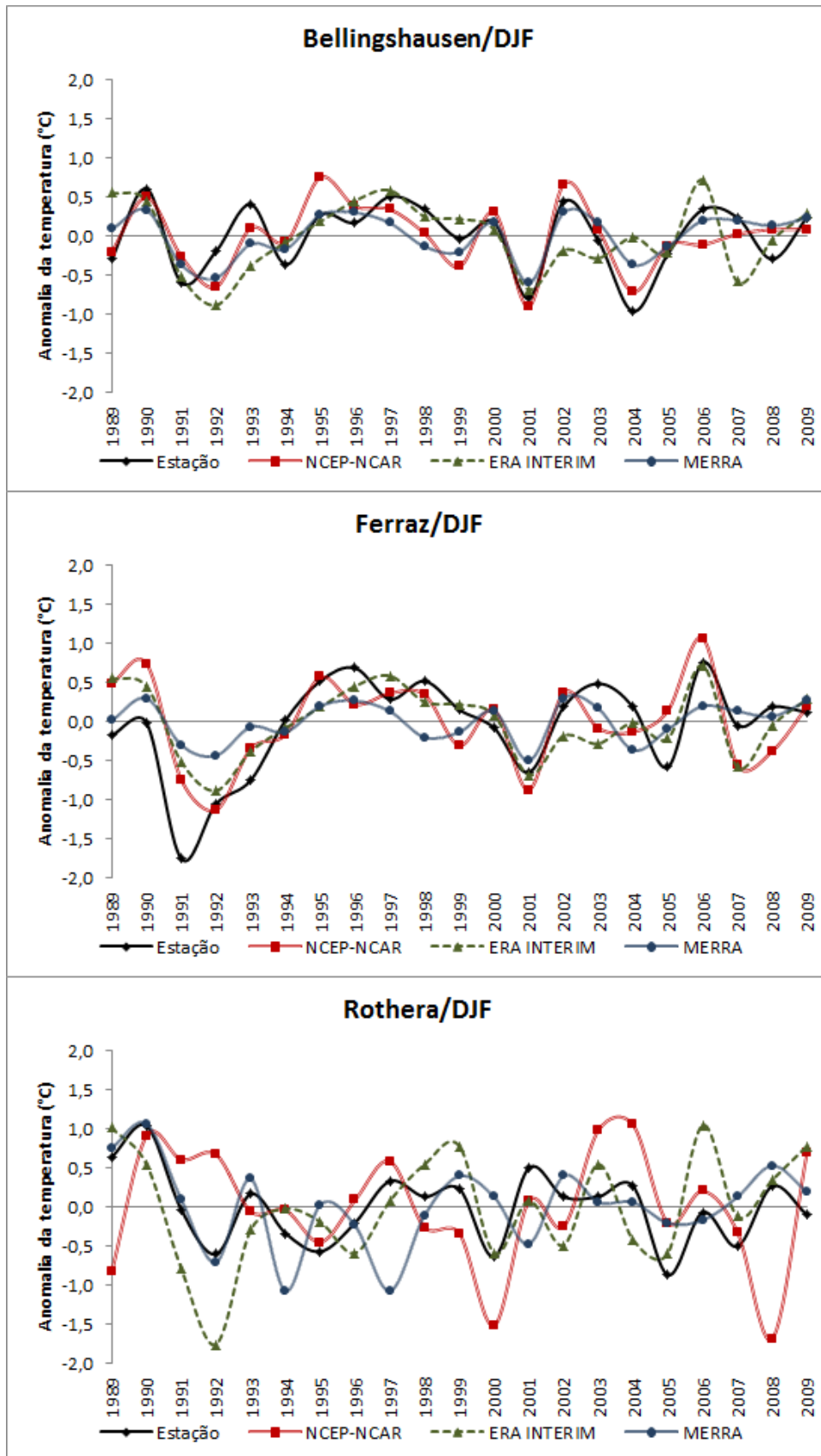


Figura 6 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor da Península Antártica e Shetland do Sul: reanálises para o verão.

Tabela 6 - Resultados da análise estatística dos valores das reanálises com os valores obtidos nas estações da Península Antártica e Shetland do Sul durante o verão (DJF)

	MBE	RMSE	r ²	R	D	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	0,0005	0,278	0,611	0,782	0,880	0,688
ERA-Interim	0,0005	0,454	0,196	0,442	0,676	0,299
MERRA	0,001	0,289	0,540	0,735	0,819	0,602
Ferraz						
NCEP/NCAR	0,045	0,460	0,462	0,680	0,816	0,555
ERA-Interim	0,044	0,442	0,463	0,681	0,795	0,541
MERRA	0,044	0,493	0,366	0,605	0,616	0,373
Rothera						
NCEP/NCAR	-0,0005	0,768	0,046	0,214	0,504	0,108
ERA-Interim	0,0000	0,570	0,305	0,552	0,698	0,385
MERRA	0,011	0,520	0,192	0,439	0,677	0,297

3.1.2. Outono (MAM)

Segundo Thompson e Solomon (2002), o período do outono (março, abril e maio) é caracterizado por mudanças na circulação troposférica na Antártica. Entre as mudanças está o fortalecimento dos ventos na região da Península Antártica, principalmente na parte ocidental.

Ao analisar a Figura 7, verifica-se em Rothera o quanto as reanálises apresentam variações muito diferentes entre si e em relação à temperatura observada, apenas o ERA-Interim obteve índices satisfatórios com índice de confiança (c) bom, e $d = 0,835$ que representa bom grau de exatidão, a correlação (r) também foi alta e r^2 razoável (Tabela 1A do Apêndice).

Como o esperado, as reanálises para as estações de Bellingshausen e Ferraz não obtiveram valores muito discrepantes, as três reanálises acompanharam bem a variação da temperatura e foram muito semelhantes entre elas, apenas com pequenas variações em determinados anos. Os resultados obtidos pelas reanálises para o outono austral foram bem satisfatórios.

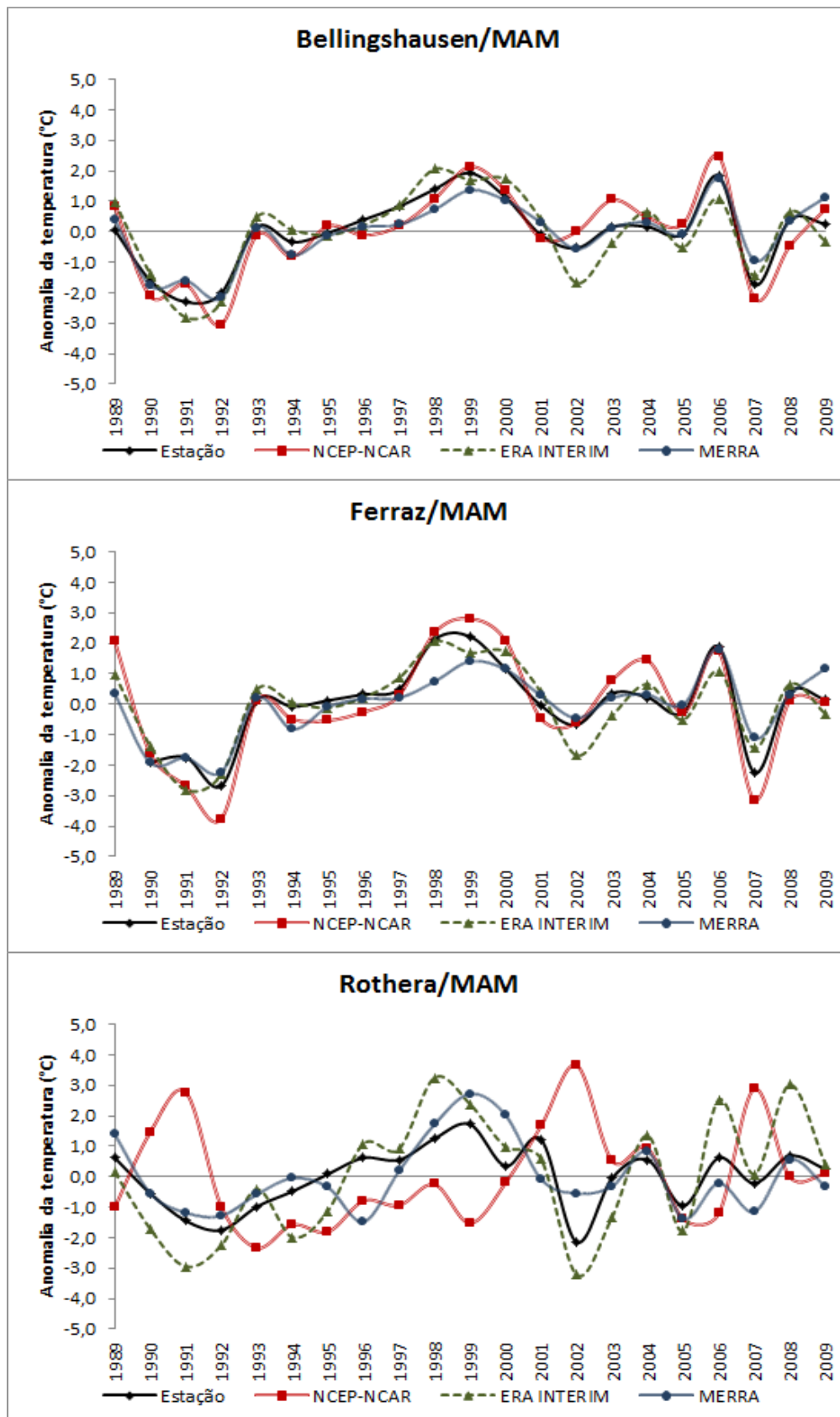


Figura 7 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor da Península Antártica e Shetland do Sul e reanálises para o outono.

Outra característica do outono austral é o aumento da temperatura em todos os setores da Península e Shetland do Sul, mas principalmente no setor oeste da Península (STEIG et al., 2009; JACOBS; COMISO, 1997). De acordo com Kejna (2003), as maiores tendências de aquecimento na Península Antártica durante 1958-2000 foram as estações Esperanza (1,62°C/10 anos), Marambio (2,09°C/10 anos), Palmer (0,98°C/10 anos) e na estação Urano (3,61°C/10 anos).

3.1.3. Inverno (JJA)

De acordo com Turner et al. (2005), as tendências de aquecimento sazonais das temperaturas são maiores durante o inverno (junho, julho e agosto), essa é a época do ano que os mecanismos de feedback entre gelo marinho e temperatura do ar são mais eficazes. Assim, pequena variação no gelo marinho pode ter grande impacto sobre as temperaturas do ar, principalmente no setor oeste da Península. King e Harangozo (1998) encontraram maior aquecimento do lado ocidental da Península justamente durante o inverno austral, com as temperaturas em Faraday aumentando em 1,03°C/década durante 1950-2006.

Na Península e Shetland do Sul existe aumento da temperatura do ar em superfície a cada temporada, principalmente durante o período de outono-inverno, a tendência de aquecimento da temperatura no inverno chega a 2,5 vezes maior que no verão (KEJNA, 2003; STARK, 1994). Esse aquecimento anômalo que ocorre durante o inverno em diferentes estações também tem influência na amplitude anual da temperatura do ar. Por exemplo, no setor oeste da Península, King (1994) encontrou amplitude anual de -1,28°C/década para a estação Faraday e -1,03°C/década para Rothera, a razão para as diminuições das amplitudes anuais, segundo o autor, é o aumento das temperaturas de inverno nesta região.

Ainda de acordo com King (1994), as estações no extremo norte da Península apresentam grandes amplitudes. Na Tabela 5, observa-se que as estações das Ilhas Shetland do Sul, Ferraz e Bellingshausen apresentaram pequena tendência de resfriamento, enquanto Rothera indicou tendência de aquecimento. Esse resfriamento que ocorreu nas estações das Shetland do Sul

pode ser o responsável pelo resfriamento que ocorreu na segunda parte da série (a partir do ano 2000) e que contraria a maioria dos resultados obtidos em estudos anteriores.

Por meio da Figura 8, nota-se que ocorre grande variação da temperatura do ar em superfície do setor oeste da Península. As reanálises não conseguem acompanhar a variação da temperatura na estação Rothera, o ERA-Interim e o MERRA são as reanálises que mais próximo conseguem chegar da temperatura observada. Embora, os índices encontrados são baixos (Tabela 2A do Apêndice).

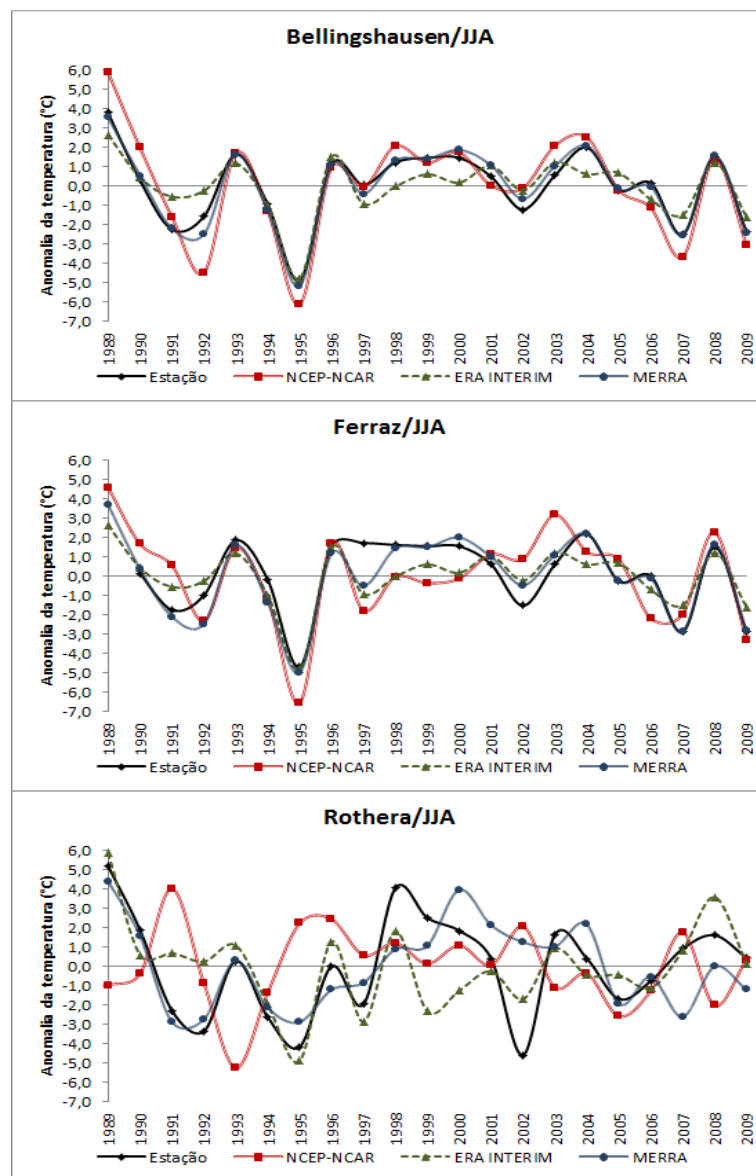


Figura 8 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor da Península Antártica e Shetland do Sul e reanálises para o inverno.

Enquanto para Rothera as reanálises tiveram mau desempenho, para as estações de Bellingshausen e Ferraz, o processo foi inverso, os valores encontrados foram satisfatórios, apenas dois detalhes devem ser levados em consideração: os altos valores para RMSE, o que indica grande variação em relação aos observados e as três reanálises subestimaram a temperatura em relação ao observado (MBE negativo).

3.1.4. Primavera (SON)

De acordo com Kejna (2003), a primavera (setembro, outubro e novembro), na região da Península Antártica e Shetland do Sul, caracteriza-se por pequena variação de temperatura e por não apresentar tendência significativa. Nas Ilhas Shetland do Sul a crescente tendência de aquecimento foi abrandada no inverno e na primavera, esse processo está relacionado com invernos e primaveras frias, destaque especial para os anos de 1994, 1995, 1997 e 1998. O resfriamento considerável nesta região está relacionado à entrada de massas de ar frio do sul e sudeste da região Antártica junto a Península sob a forma de ventos de barreira (SCHWERDTFEGGER, 1984). Em estudo mais recente, Steig et al. (2009) demonstraram que entre os anos de 1957 e 2006 a região da Península tem forte aquecimento no inverno e na primavera, e aponta como possíveis consequências às alterações regionais da circulação atmosférica, alterações no gelo marinho e na redução do ozônio troposférico. Pela Tabela 5, observa-se que nenhuma das estações desta região apresentou tendência significativa.

Pela Figura 9, percebe-se que apesar da temperatura em superfície apresentar variação pequena, as complexas interações que ocorrem neste período são os principais fatores contribuintes para o fraco desempenho das reanálises no setor oeste da Península na região da estação Rothera, todos os índices calculados ficaram a desejar (Tabela 3A do Apêndice).

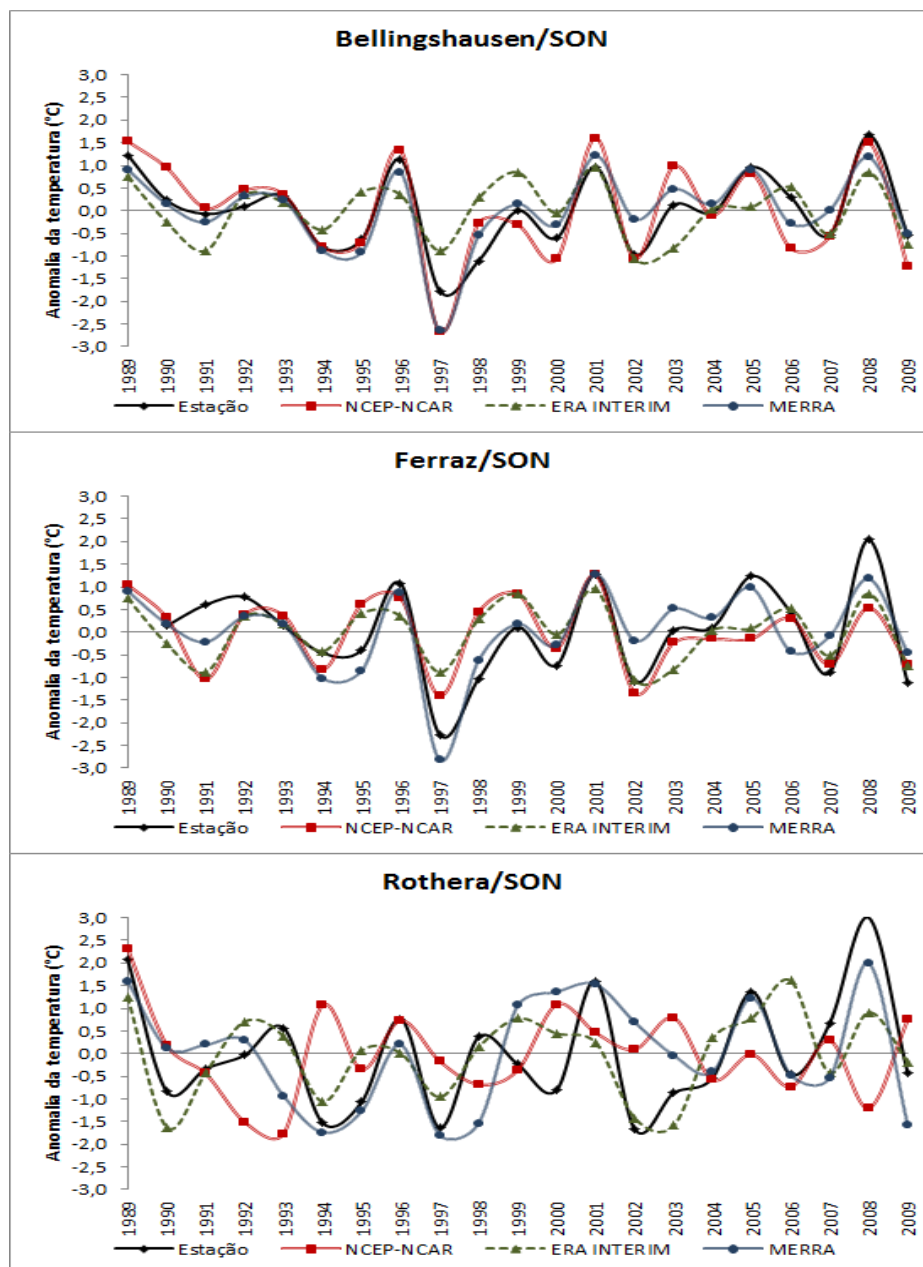


Figura 9 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor da Península Antártica e Shetland do Sul e reanálises para a primavera.

Para as estações de Bellingshausen e Ferraz as reanálises obtiveram resultado um pouco melhor, o NCEP-NCAR e o MERRA obtiveram desempenho satisfatório, principalmente a segunda reanálise, com valores de (c), (d) e (r) muito bons, já os valores de RMSE e (r^2) ficaram pouco abaixo. Novamente as reanálises apresentaram a tendência de temperatura mais frias (na maioria das ocasiões) em relação ao observado.

3.2. Setor do Oceano Índico e Mar de Weddell

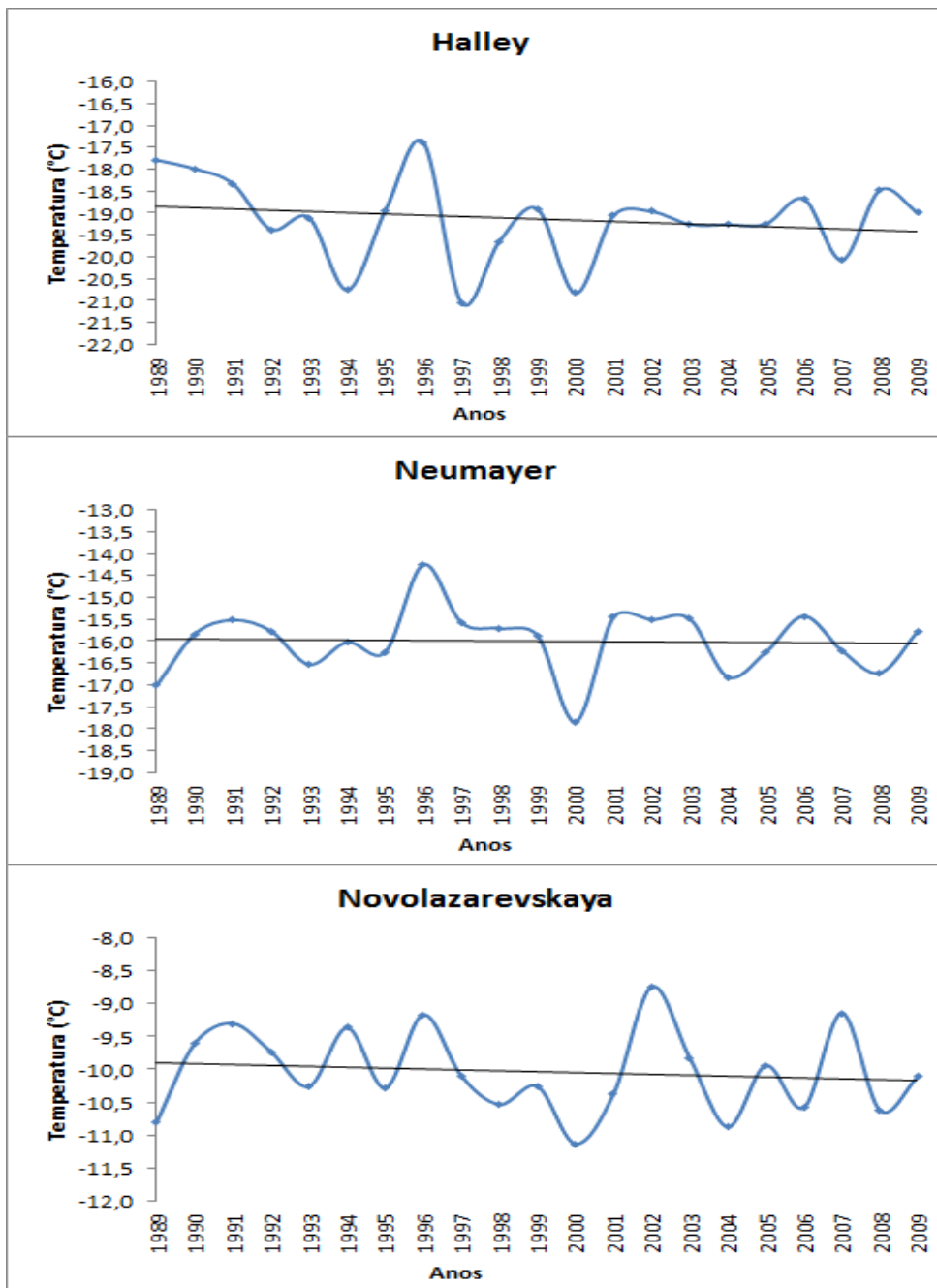
Esta região da Antártica é caracterizada por apresentar elevado gradiente meridional da orografia. As condições meteorológicas apresentam variabilidade anual, como consequência da grande variação do gelo na região do Mar de Weddell. Os resultados mostrados na Tabela 7 indicam tendência de resfriamento para as estações Halley e Novolazarevskaya e aquecimento para Neumayer. É importante notar que as diferenças entre as estações são bastante consideráveis. Halley foi a estação que apresentou a maior variação durante o período de estudo.

Tabela 7 - Análise de tendência anual e sazonal da temperatura do ar (°C) para as estações do Oceano Índico e Mar de Weddell

Estação	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Halley	-0,75	2,14*	0,9	-0,45	-1,42
Neumayer	0,27	-1,05	0,51	0,24	-0,54
Novolazarevskaya	-0,78	-2,11*	0,12	0,24	-0,87

Nota: Valores em negrito e com (*) são estatisticamente significativos a 5%.

Na Figura 10, nota-se que as três estações indicaram pequena tendência de resfriamento. Na primeira década (1989-1999), as estações apresentaram tendências bastante diferentes, enquanto Halley obteve forte tendência de resfriamento ($\sim -1,5^{\circ}\text{C}$), Neumayer mostrou aquecimento significativo ($\sim +0,8^{\circ}\text{C}$). Já Novolazarevskaya apresentou pequena tendência de resfriamento. Na segunda década em estudo (2000-2009), as três estações apresentaram tendência de aquecimento, com atenção especial para Halley que obteve aquecimento de aproximadamente $+0,8^{\circ}\text{C}$, as outras duas estações da região apresentaram tendência de aquecimento menor ($\sim +0,4^{\circ}\text{C}$ para Neumayer e $+0,25^{\circ}\text{C}$ para Novolazarevskaya).



Nota: Os gráficos estão em escala diferentes, para melhor visualização.

Figura 10 - Variação média anual da temperatura do ar (°C) em superfície entre 1989 a 2009 para as estações no setor do Oceano Índico e Mar de Weddell e tendência linear das séries.

3.2.1. Verão (DJF)

Kejna (2003) observou que a região ocidental do continente Antártico tem sido dominada por aquecimento progressivo, à exceção da região do Mar de Weddell. Todavia, a partir da década de 80, os verões se tornaram mais quentes. A Tabela 7 apresenta grande tendência de aquecimento para a estação de Halley em nível de significância de 5%. Por outro lado, as estações de Novolazarevskaya e Neumayer indicaram tendência de resfriamento durante o verão.

A comparação entre as observações e as reanálises (Figura 11 e Tabela 1B) indica que as temperaturas em superfície apresentam pequenas variações. O ERA-Interim demonstra fraco desempenho para esta região, com valores de RMSE, “r”, “r²” e “c” muito baixos. O MERRA e o NCEP-NCAR apresentaram desempenho semelhante, mas indicam bom resultado para a exatidão das reanálises (índice “d”).

3.2.2. Outono (MAM)

Para essa região do continente, de acordo com a Figura 12 e a Tabela 8, as reanálises não obtiveram bom desempenho durante o outono, principalmente nas estações Halley e Neumayer onde todos os índices estatísticos calculados foram baixos. Na estação Novolazarevskaya, o MERRA apresentou melhor desempenho, mas ainda assim com RMSE elevado e tendência de subestimar a temperatura em relação aos valores observados.

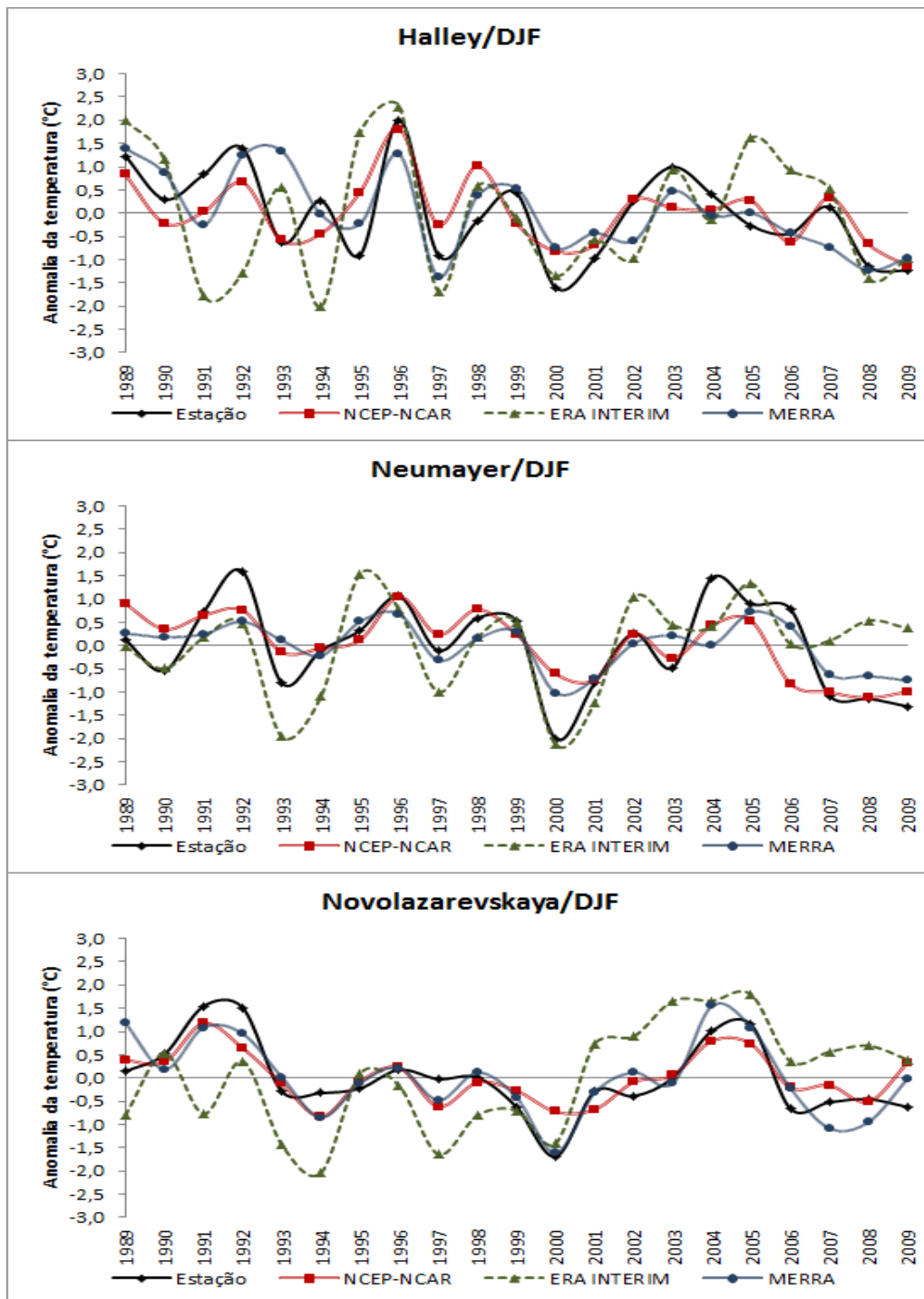


Figura 11 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Índico e Mar de Weddell e reanálises para o verão.

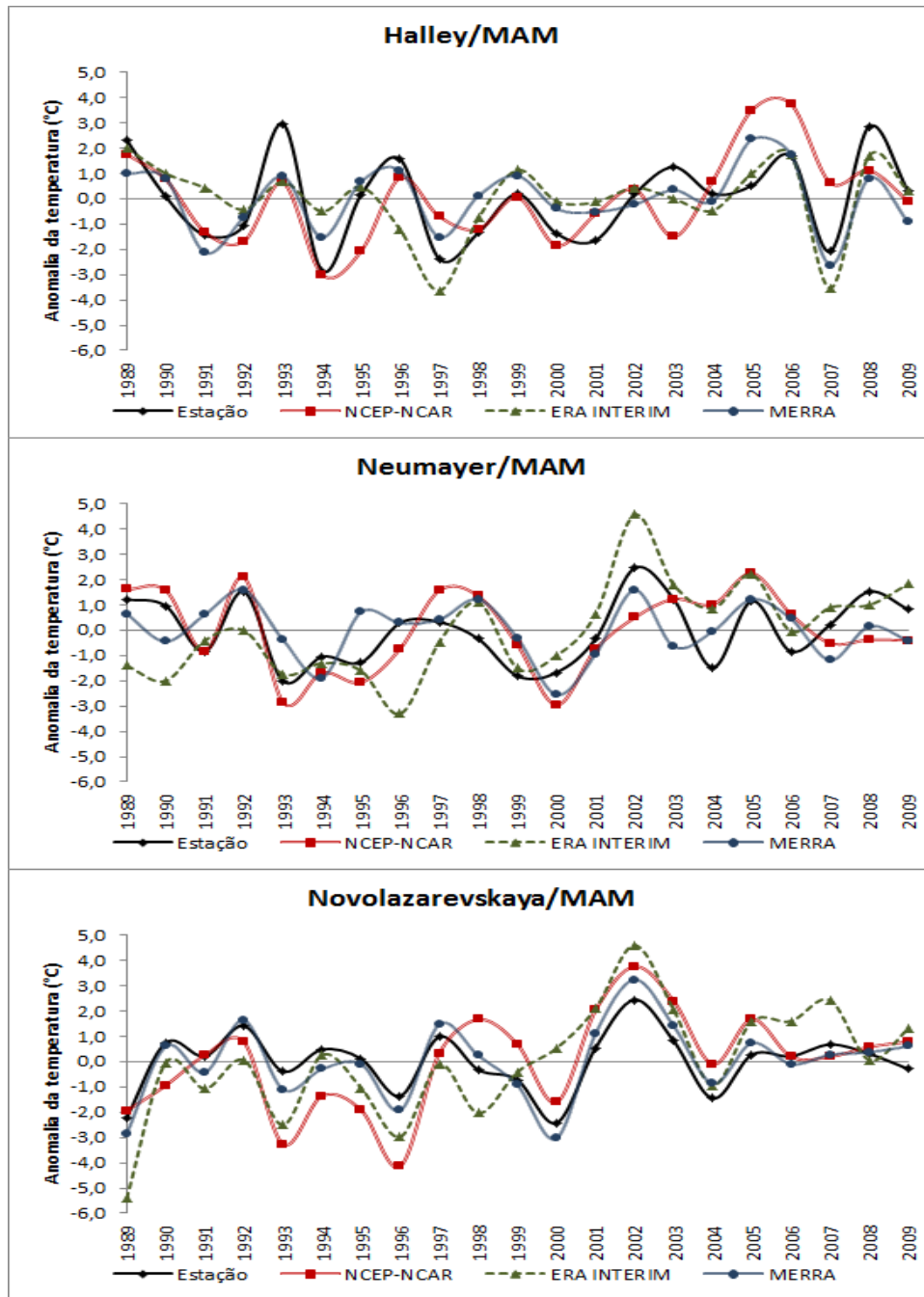


Figura 12 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Índico e Mar de Weddell e reanálises para o outono

Tabela 8 - Resultados da análise estatística dos valores das reanálises com os valores obtidos nas estações do Mar de Weddell e Oceano Índico durante o outono (MAM)

	MBE	RMSE	r ²	r	d	c
Halley						
NCEP/NCAR	-0,0005	1,508	0,348	0,590	0,760	0,448
ERA-Interim	0,001	1,309	0,419	0,647	0,794	0,514
MERRA	0,001	1,097	0,558	0,747	0,837	0,626
Neumayer						
NCEP/NCAR	0,003	1,205	0,409	0,639	0,795	0,508
ERA-Interim	0,001	1,533	0,272	0,521	0,714	0,372
MERRA	0,0005	1,213	0,214	0,462	0,687	0,318
Novolazarevskaya						
NCEP/NCAR	0,0005	1,472	0,371	0,609	0,723	0,441
ERA-Interim	-0,002	1,599	0,450	0,671	0,728	0,488
MERRA	-0,002	0,545	0,884	0,940	0,955	0,898

3.2.3. Inverno (JJA)

Segundo Kejna (2003), as temperaturas próximas a superfície nesta parte da Antártica foi dominada por aumento de temperatura durante o período de 1958 a 2000. De acordo com o autor, todavia, nos últimos anos (até 2003) quedas de temperaturas têm sido observadas na região. Por meio da Tabela 7, constata-se que apenas a estação de Halley demonstrou pequeno resfriamento, enquanto Halley e Novolazarevskaya apresentam pequena tendência de aquecimento. É importante notar que os resultados aqui apresentados diferem em várias situações as análises prévias.

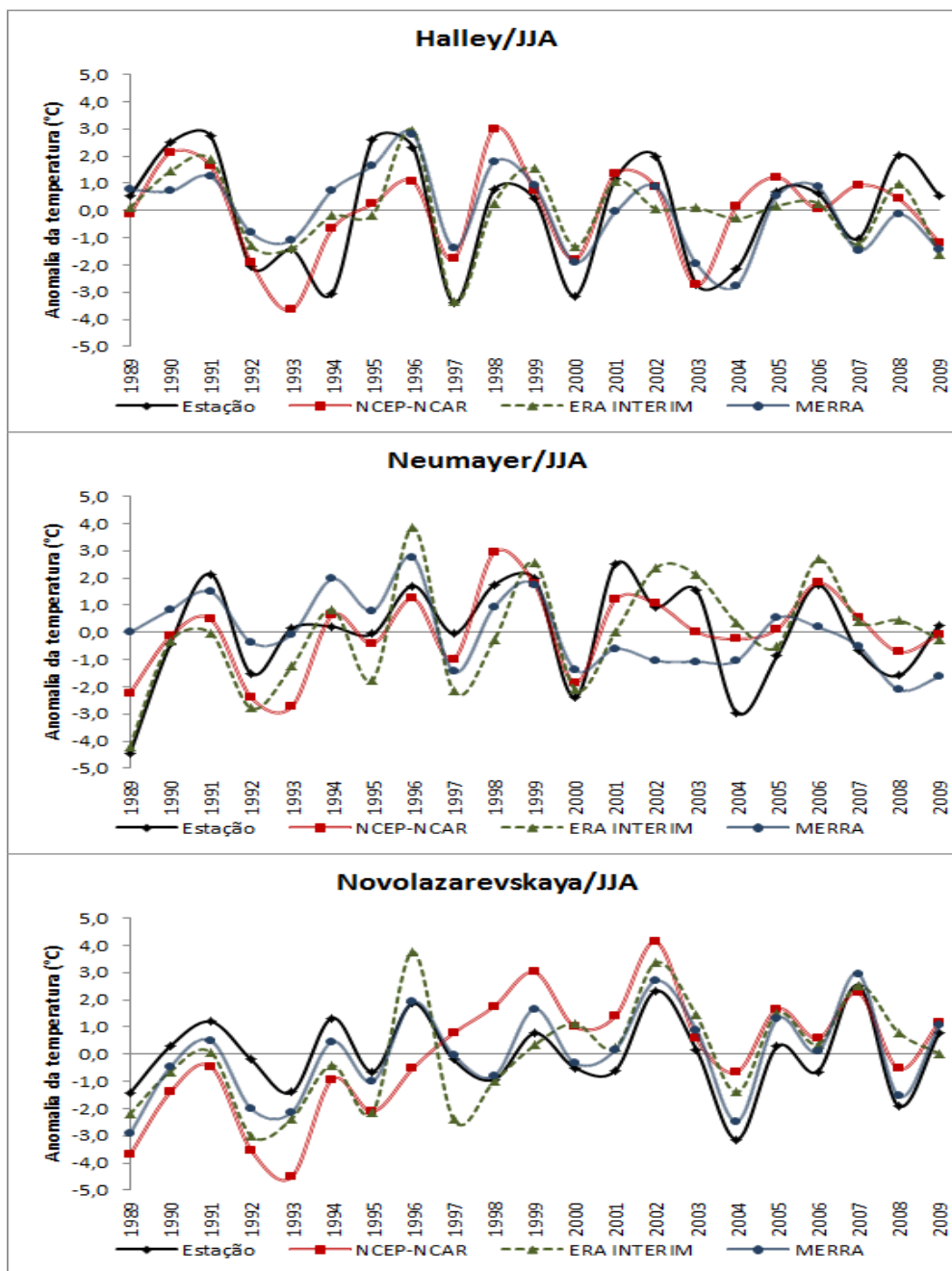


Figura 13 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Índico e Mar de Weddell e reanálises para o inverno.

Assim como no outono, durante o período de inverno (Figura 1B e Tabela 2B do Apêndice), as reanálises obtiveram desempenho fraco para esta região, o mais notável são os altos índices de RMSE das três reanálises para as três estações, o que indica a grande variação das reanálises em relação à temperatura observada. Os valores de “c” e “r²” também são baixos indicando imprecisões das reanálises. A única exceção foi o MERRA na estação de Novolazarevskaya, assim como no outono apresentou bom índice de concordância “d” e bom índice de confiança “c”. Em Novolazarevskaya é interessante destacar que com base no MBE pode-se concluir que as três reanálises subestimam a temperatura. O ERA-Interim subestimou a temperatura nas três estações durante o outono austral.

3.2.4. Primavera (SON)

Na Figura 14, verifica-se a grande variação que a temperatura observada apresentou ao longo dos anos. A comparação com as reanálises mostra melhora nos índices estatísticos (Tabela 3B do Apêndice). O NCEP-NCAR obteve melhor desempenho em Halley e ficou muito abaixo nas outras duas estações da região. Novamente os valores de RMSE foram altos nas três estações.

3.3. Setor do Oceano Pacífico

A Tabela 9 mostra que todas as estações apresentam pequenas tendências de aquecimento, vale ressaltar, que a estação de Mirny indicou tendência de aquecimento significativa em nível de 5%. A variabilidade na região polar é tamanha que a estação de Davis que está a menos de 500 km de distância de Mirny não apresentou tendência de aquecimento significativa. Para segunda década (a partir do ano 2000) apenas a estação Davis demonstrou pequeno resfriamento, enquanto Mirny apresentou tendência de aquecimento significativa. Para esta década é interessante notar que o ano de 2007 também apresenta tendência de aquecimento considerável.

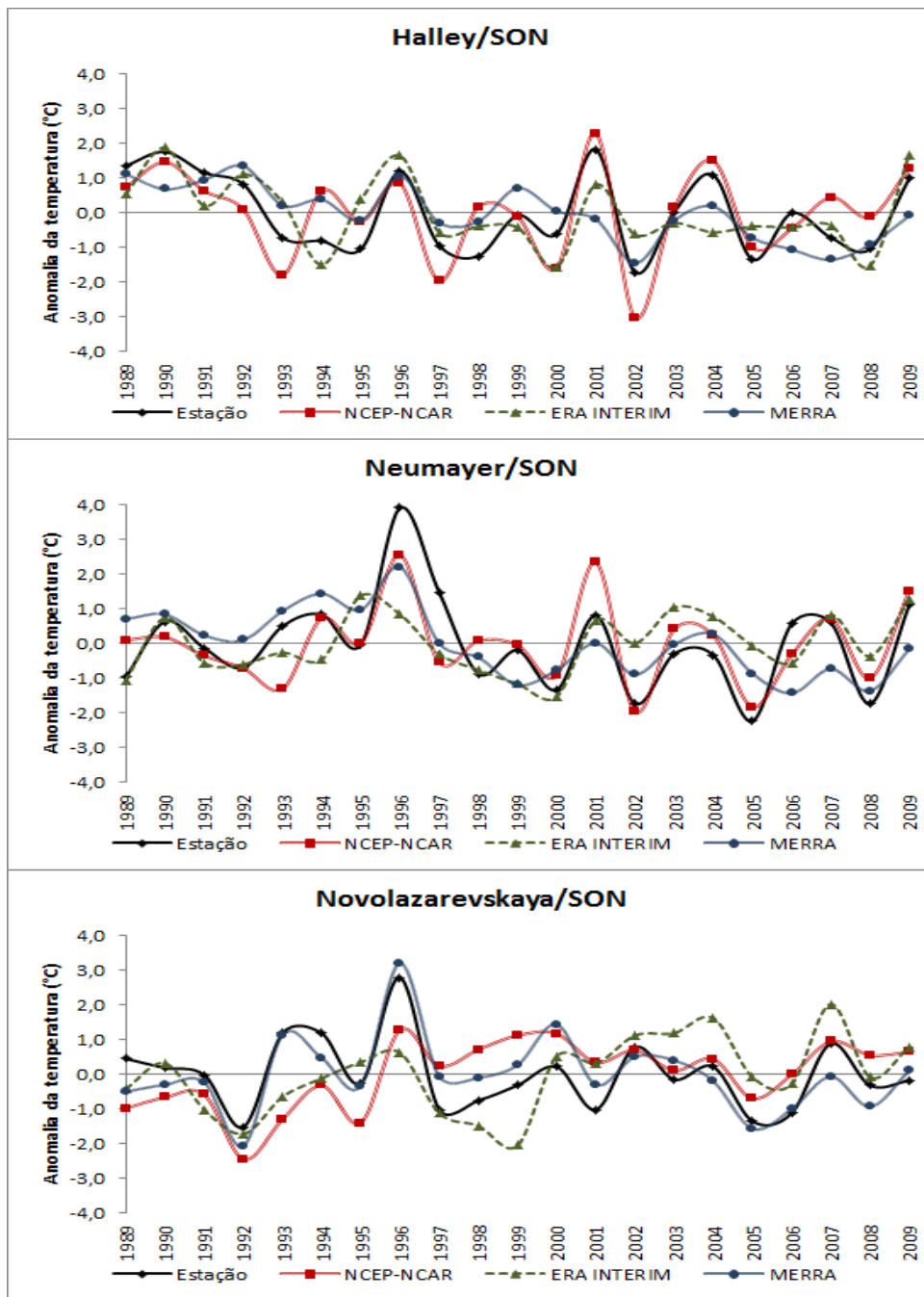


Figura 14 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Índico e Mar de Weddell e reanálises para a primavera.

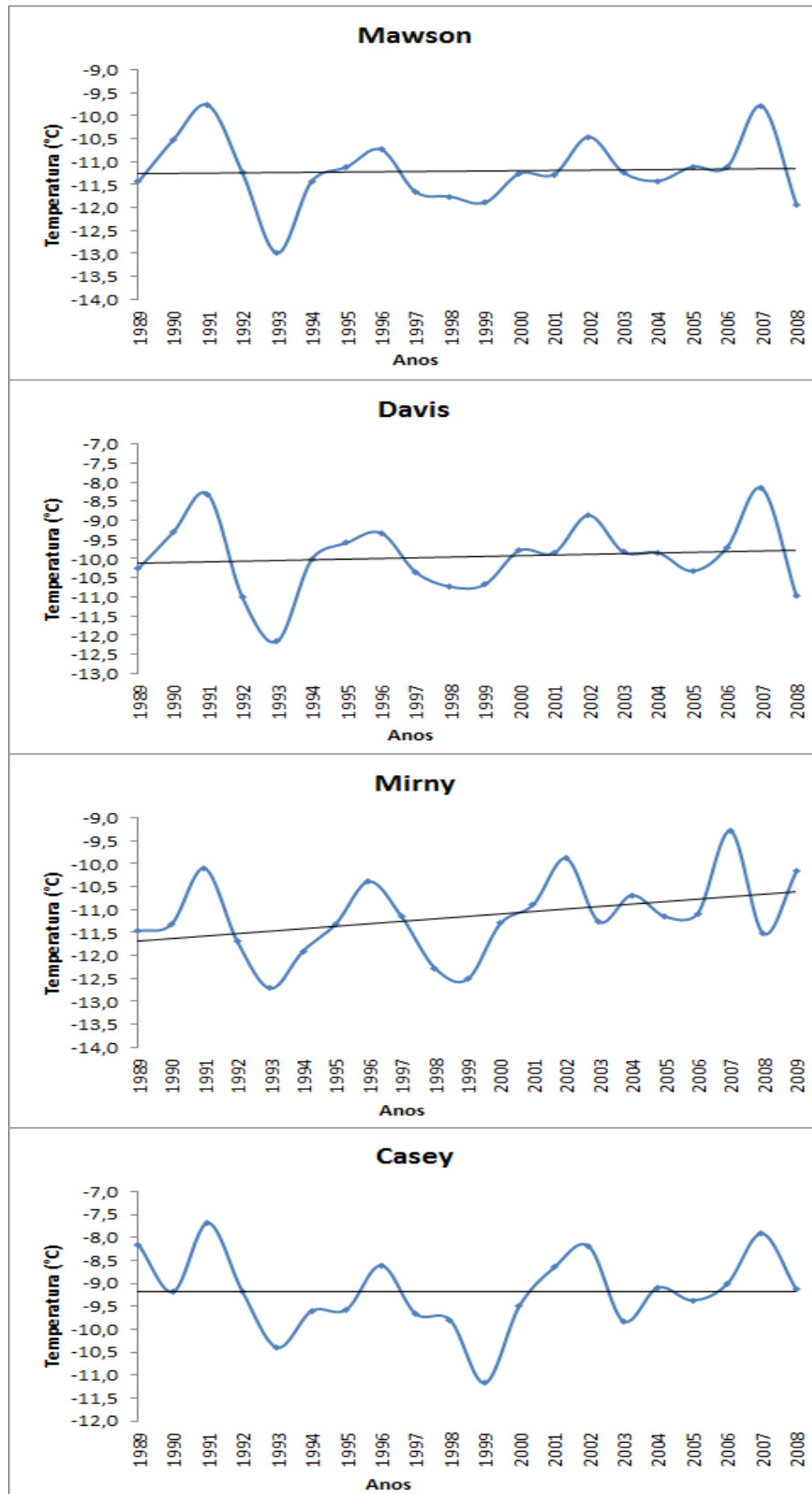
Tabela 9 - Análise de significância da tendência anual e sazonal da temperatura do ar (°C) para as estações do setor Oceano Pacífico

Estação	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Mawson	0,19	-0,90	1,99*	-0,68	0,58
Davis	0,35	0,72	2,44*	-1,39	0,45
Mirny	1,96*	0,99	2,38*	0,39	0,87
Casey	0,19	-0,72	1,35	0,09	0,00

Nota: Valores em negrito e com (*) são estatisticamente significativos a 5%.

Na Figura 15, está indicada a variação da temperatura observada para as quatro estações desta região e, conforme Tabela 9, a estação Mirny é a única que apresenta tendência de aquecimento significativo. Mas vale ressaltar que, para a primeira década (década de 90), todas as estações mostram tendências de resfriamento (não apresentado). As estações de Casey e Mawson foram as que tiveram maior tendência de resfriamento. Comiso (2000) encontrou altas temperaturas de superfície na região leste da Antártica que são significativamente durante os anos de 1990 e 1991, o que está claramente indicado na Figura 15.

A Antártica Oriental é dominada por imensos blocos de gelo com alturas acima dos 4.000 metros em relação ao nível do mar, assim a influência e a interação do mar e do gelo marinho circundante com a superfície da Antártica Oriental é limitada por uma fina faixa, justamente nesta faixa é que estão localizadas as estações automáticas utilizadas no estudo deste setor (KING; TURNER, 1997; KEJNA, 2003).



Nota: Os gráficos estão em escala diferentes, para melhor visualização.

Figura 15 - Variação média anual da temperatura do ar (°C) em superfície entre 1989 a 2009 para as estações no setor do Oceano Pacífico e tendência linear das séries.

3.3.1. Verão (DJF)

Para o verão austral nenhuma das estações apresentou tendências significativas (Tabela 5), enquanto as estações localizadas mais ao extremo da região (Mawson e Casey) mostram pequenas tendências de resfriamento. Mirny e Davis indicaram tendência de aquecimento pequena. Ao analisar a Figura 16, verifica-se que a variação da temperatura observada é pequena, fato também mostrado pelas reanálises. Pela Tabela 1C do Apêndice, é evidente que as reanálises apresentaram coeficiente de determinação baixo, o melhor resultado encontrado foi conseguido pelo MERRA na estação Davis (0,79).

Os índices de concordância foram satisfatórios na maioria dos casos variando entre 0,7 e 0,8, somente o ERA-Interim na estação Mawson que ficou abaixo desta estimativa. O ERA-Interim na mesma estação também apresentou o maior índice RMSE. Ao analisar os valores de BEM, percebe-se que o MERRA subestimou a temperatura em todas as estações, enquanto o NCEP-NCAR superestimou em Davis e subestimou nas demais estações. O ERA-Interim superestimou em três das quatro estações desta região.

3.3.2. Outono (MAM)

Ao analisar a variação da temperatura em superfície na Antártica, é de grande importância observar o período estudado. Um bom exemplo acontece neste caso para o outono austral, Kejna (2003) analisou a variação de temperatura durante 1958 a 2000 e Steig et al. (2009) analisaram para o período de 1957-2007. Ambos os estudos encontram tendências de resfriamento para o outono. De acordo com a Tabela 9, verifica-se que três das quatro estações apresentaram tendência de aquecimento significativo para o período entre 1989 a 2009. Apenas a estação de Casey que não apresentou tendência de aquecimento estatisticamente significativa. As estações de Mirny e Davis apresentaram forte tendência de aquecimento.

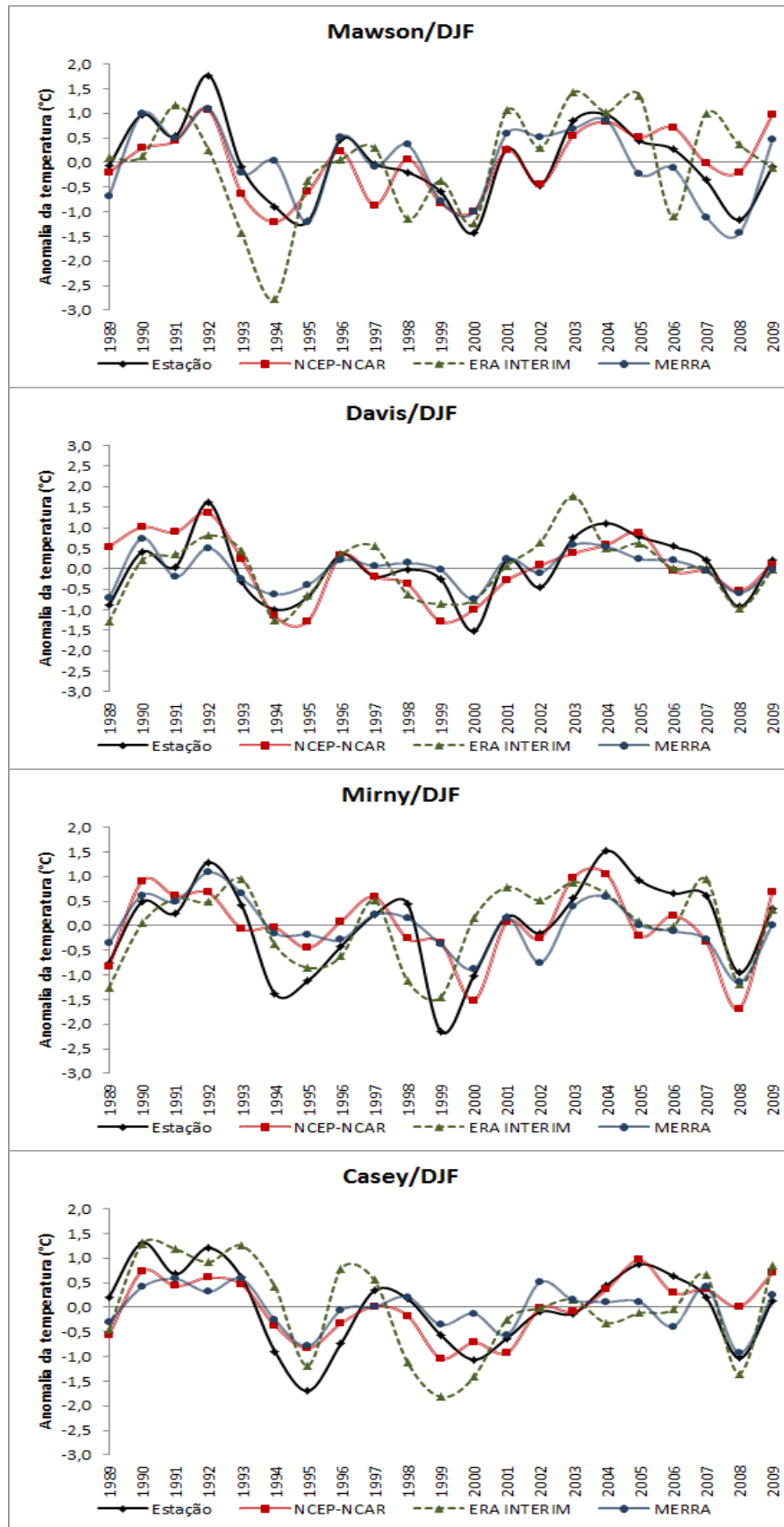


Figura 16 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Pacífico e reanálises para o verão.

Diferente do observado para o verão, no outono as reanálises apresentaram resultado satisfatório com exceção do ERA-Interim na estação Casey, que obteve os valores dos índices estatísticos menores do que o proposto pelas demais reanálises. Pode-se concluir que a região está passando por período de aquecimento embora as reanálises ainda não acompanhem essa variação. Isso é demonstrado pelos valores de MBE. As três reanálises subestimaram a temperatura em todas as estações durante o outono. Pela Tabela 10, os valores do RMSE foram altos, enquanto os valores de “d” “r” e do índice de confiança “c” foram muito bons. Isso indica que os resultados das reanálises apresentaram boa exatidão em relação aos dados observados.

Tabela 10 - Resultados da análise estatística dos valores das reanálises com os valores obtidos nas estações do Oceano Pacífico durante o outono (MAM)

	MBE	RMSE	r ²	R	D	C
Mawson						
NCEP/NCAR	-0,014	0,867	0,782	0,884	0,936	0,828
ERA-Interim	-0,015	1,311	0,744	0,863	0,891	0,769
MERRA	-0,012	0,864	0,735	0,858	0,923	0,791
Davis						
NCEP/NCAR	-0,005	0,892	0,826	0,909	0,946	0,860
ERA-Interim	-0,006	0,871	0,768	0,876	0,932	0,817
MERRA	-0,006	0,658	0,876	0,936	0,960	0,898
Mirny						
NCEP/NCAR	-0,001	0,777	0,779	0,883	0,937	0,828
ERA-Interim	-0,002	0,651	0,842	0,917	0,957	0,878
MERRA	0,000	0,691	0,848	0,921	0,931	0,858
Casey						
NCEP/NCAR	-0,048	1,023	0,743	0,862	0,920	0,793
ERA-Interim	-0,050	1,176	0,605	0,778	0,879	0,684
MERRA	-0,050	0,820	0,800	0,895	0,913	0,817

Os resultados encontrados neste estudo, especificamente para o outono, diferem dos existentes na literatura, como citado anteriormente. Todavia, como a análise estatística de tendência indica que os valores entre as reanálises e as temperaturas observadas são estatisticamente significantes, é fácil notar a variação existente na temperatura observada na superfície da região leste do continente Antártico.

3.3.3. Inverno (JJA)

O inverno em torno da região leste do continente Antártico é caracterizado por aumento de velocidade do vento e diminuição da pressão em nível médio do mar na região da estação Mirny, Mawson e Davis (TURNER et al., 2005). Para as estações localizadas mais a leste (Mirny e Casey) percebe-se pequena tendência de aquecimento em superfície no inverno, enquanto as outras duas estações (Mawson e Davis) apresentam leve tendência de resfriamento (Tabela 9). A menor variabilidade das temperaturas na superfície da costa leste do continente Antártico mostra que esta região nesta época do ano não sofre a ação dominante de sistemas de meso-escala e de alta variabilidade espaço-temporal. Isto permite as reanálises alcançarem resultados satisfatórios (Tabela 2C do Apêndice).

Assim como no outono, os valores de “d” foram muito bons, o coeficiente de correlação foi também muito bom. O desempenho em relação ao índice “c” foi caracterizado como Bom dentro dos valores pré-estabelecido. Como encontrado em situações anteriores, os valores de RMSE foram altos indicando que as reanálises não conseguem reproduzir as variações em relação à temperatura observada. A Figura 18 mostra que o período do inverno contribuiu significativamente para a tendência de aquecimento. As reanálises dentro das limitações acompanharam a variação da temperatura observada.

Por exemplo, o inverno de 1993 foi extremamente frio e foi bem representado pelas reanálises, vale ressaltar neste caso que as reanálises do NCEP-NCAR e do ERA-Interim nas quatro estações subestimaram (MBE negativo) a temperatura em relação ao observado.

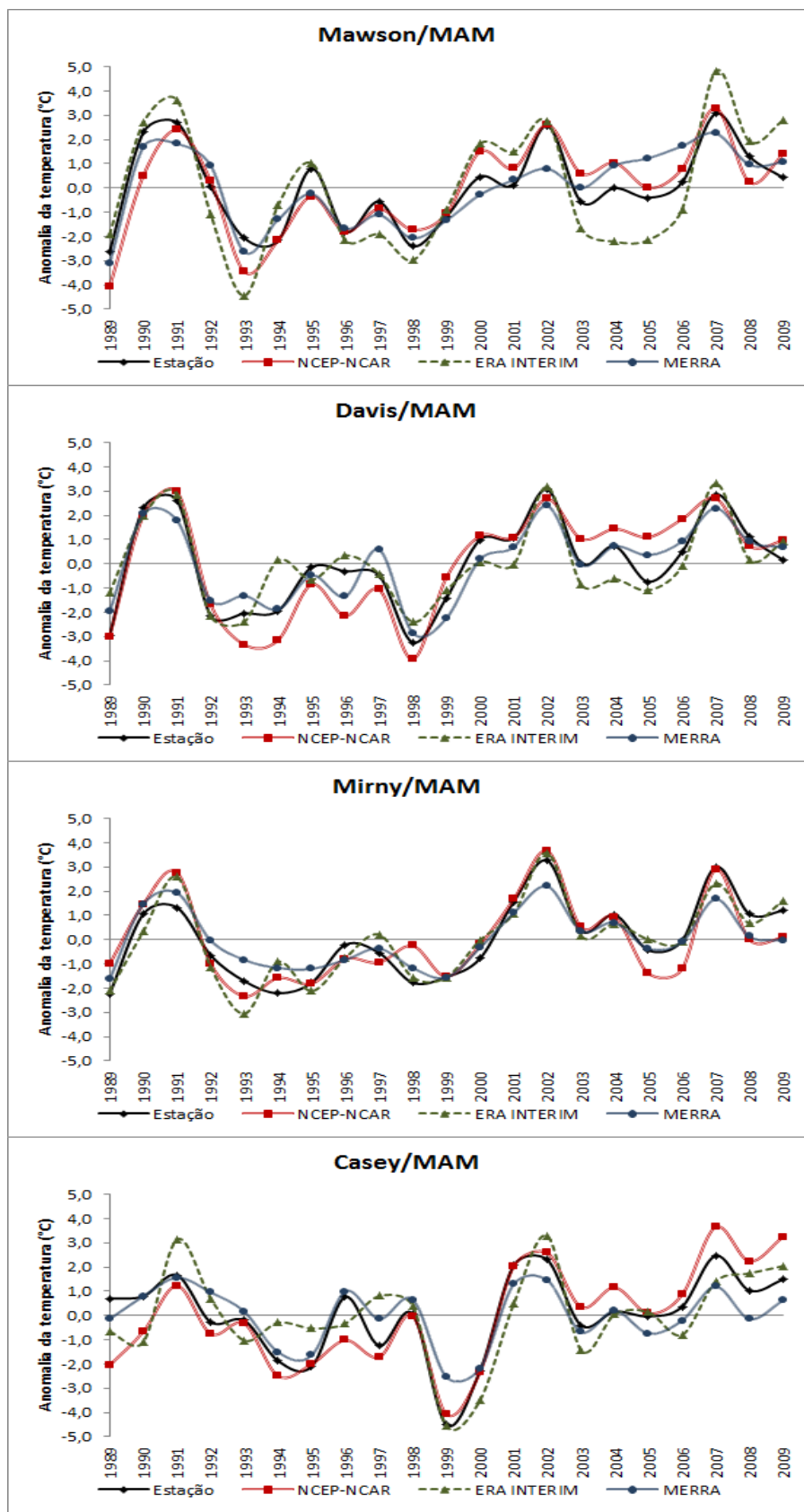


Figura 17 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Pacífico e reanálises para o outono.

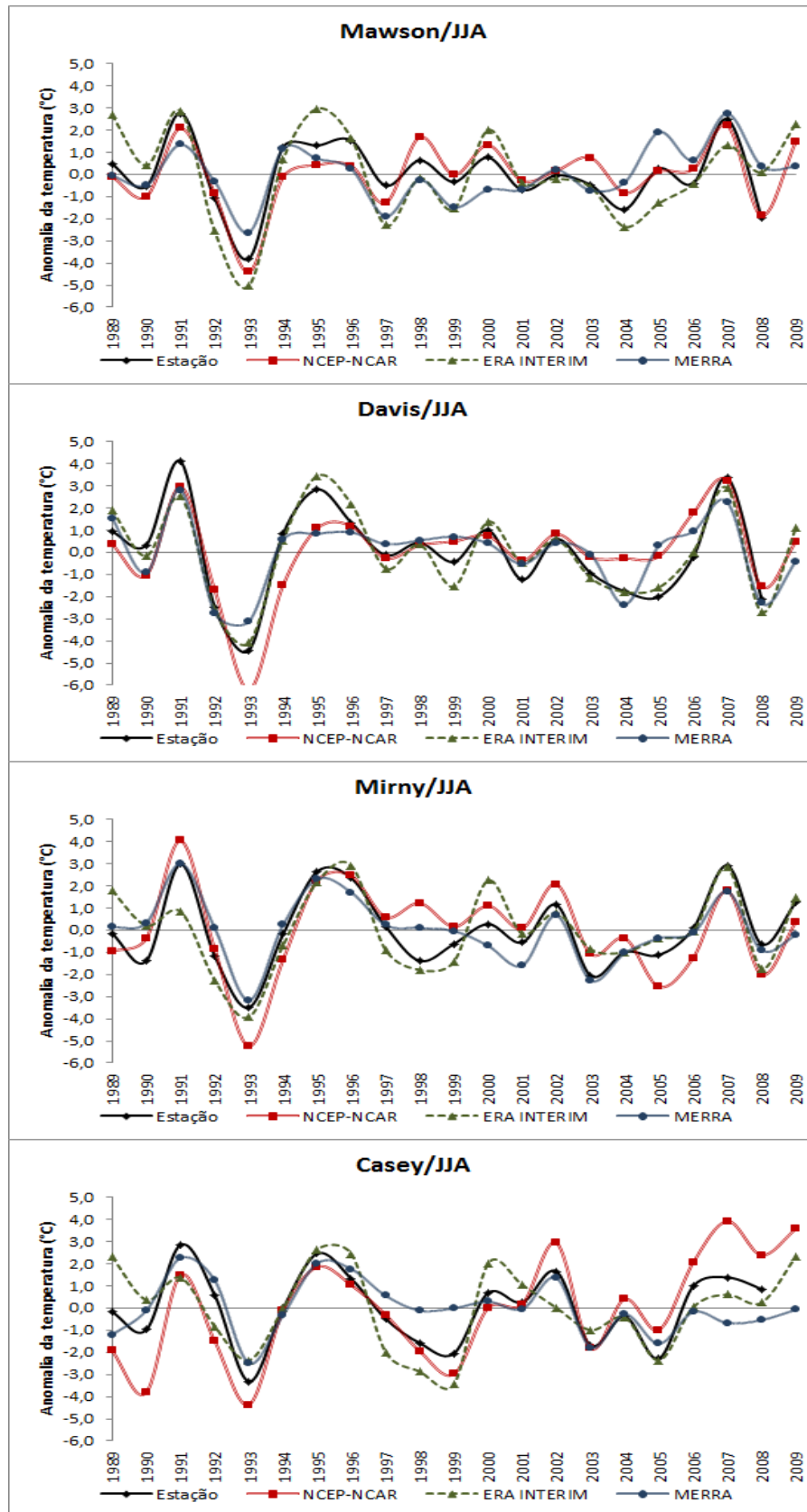


Figura 18 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Pacífico e reanálises para o inverno.

3.3.4. Primavera (SON)

Um resfriamento distinto na costa leste da Antártica foi observado por Kejna (2003) no início dos anos 80. Esta anomalia foi atribuída a redução nos níveis do ozônio estratosférico (FARMAN et al., 1985), com esse esgotamento do ozônio, a temperatura da estratosfera começou a aumentar entre 1-2°C/década, principalmente na primavera. Os distúrbios na troposfera e estratosfera provocaram mudança na altura das superfícies geopotenciais (MARSHALL, 2002) e reorganização do sistema de circulação de ar na região da Antártica. Assim, como consequência mudanças meridionais nas massas de ar entre a Antártica e latitudes menores ocorreram (CAVALIERI et al., 1997).

Por meio da Tabela 9 e da Figura 19, verifica-se que as quatro estações apresentam pequena tendência de aquecimento, e a primavera austral nesta região da Antártica apresenta pouca variação da temperatura em superfície.

Com esta pequena variação da temperatura, as reanálises apresentaram resultado satisfatório, observando a Tabela 2C do Apêndice, os valores de “r” foram considerados altos ou muito altos, assim como os valores do “d” que foram satisfatórios, o que indica que as reanálises apresentaram boa correlação com certo grau de exatidão.

Para o índice de confiança “c” o ERA-Interim obteve resposta abaixo das outras duas reanálises, ficando com o desempenho reduzido. Não diferente de outras situações, o RMSE se manteve com índices altos, e desta forma ilustrando que para esta região da Antártica, as reanálises apresentam dificuldade quanto à representação da variação da temperatura observada nas estações.

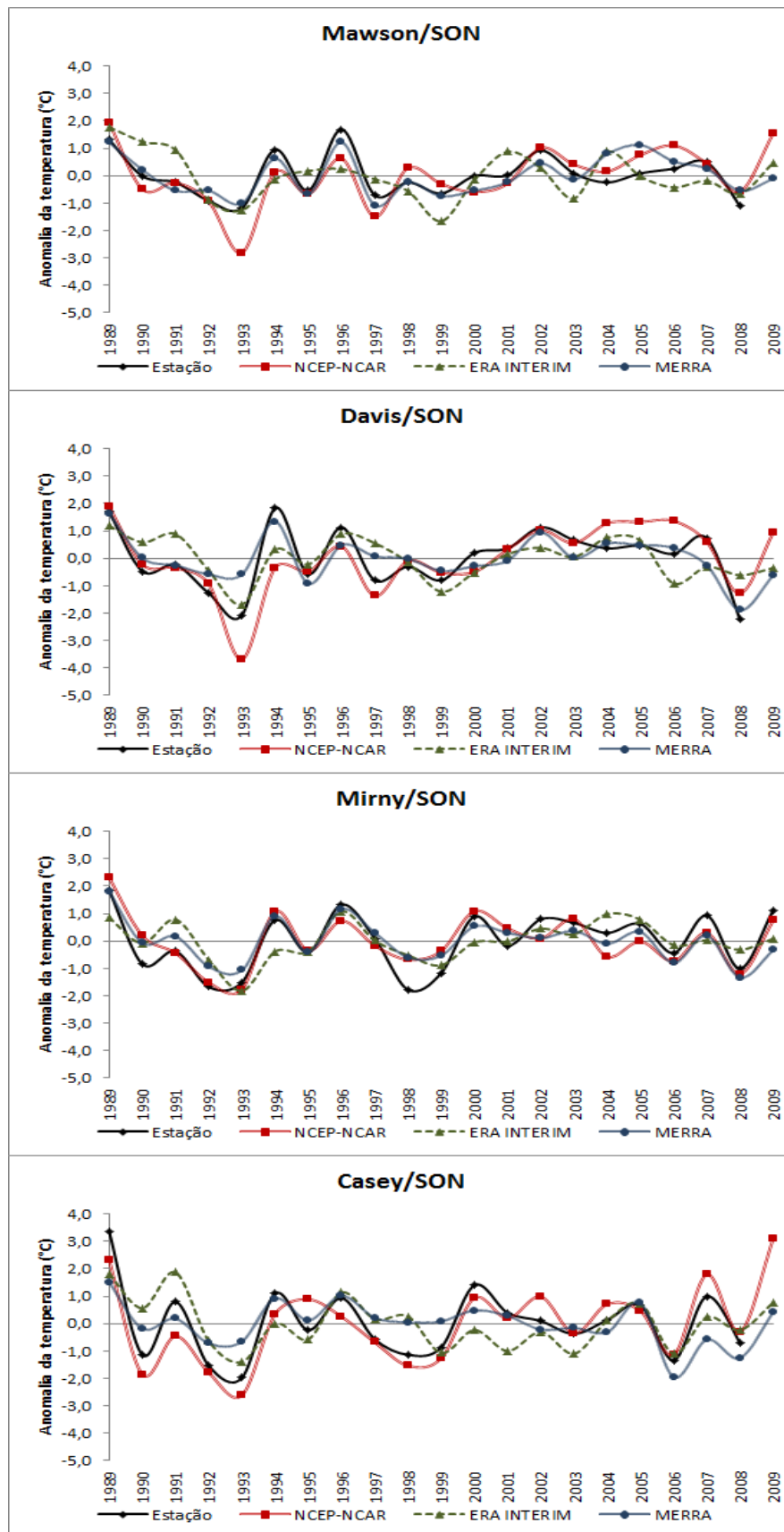


Figura 19 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Oceano Pacífico e reanálises para a primavera.

3.4. Setor do Mar de Ross

Ao longo da história pesquisadores e exploradores notaram que a dinâmica atmosférica da região do Mar de Ross é muito complexa. Muito destas bruscas variações das condições atmosféricas nesta região se devem a impressionante diferença do relevo, que varia de picos com 3.500 metros de altitude até o nível do mar na região costeira. Várias massas de ar atuam na região, entre as principais estão: (1) massa de ar frio e seco oriunda do platô continental da Antártica oriental; (2) massa fria e úmida proveniente do norte onde está localizado o gelo permanente e (3) outra massa relativamente quente e úmida marítima do mar de Ross (MONAGHAN et al., 2005). Em muitas situações estes ingredientes combinam-se de tal forma que o tempo na região torna-se muito variável. Há intensos ventos catabáticos fluindo dos vales glaciais da região são recorrentes na região do Mar de Ross (BROMWICH, 1991). A cadeia de montanhas Transantárticas é responsável pela propagação de ventos catabáticos que são muito fortes e persistentes nesta região, outra característica peculiar do Mar de Ross, é a predominância ativa de ciclogênese (CARRASCO; BROMWICH, 1994).

Utilizando um período de estudo entre 1971-2000, Turner et al. (2005) encontraram aquecimento na região da Base Scott onde as temperaturas aumentaram a taxa de 0,29°C/década, embora isso não seja estatisticamente significativo. Kejna (2003), utilizando estações situadas próximas dos glaciares do Mar de Ross, encontrou aquecimento da temperatura de 0,3-0,4°C/década. Os estudos das temperaturas de neve/gelo em profundidades de 10 metros confirmam essa tendência segundo Kejna (2003).

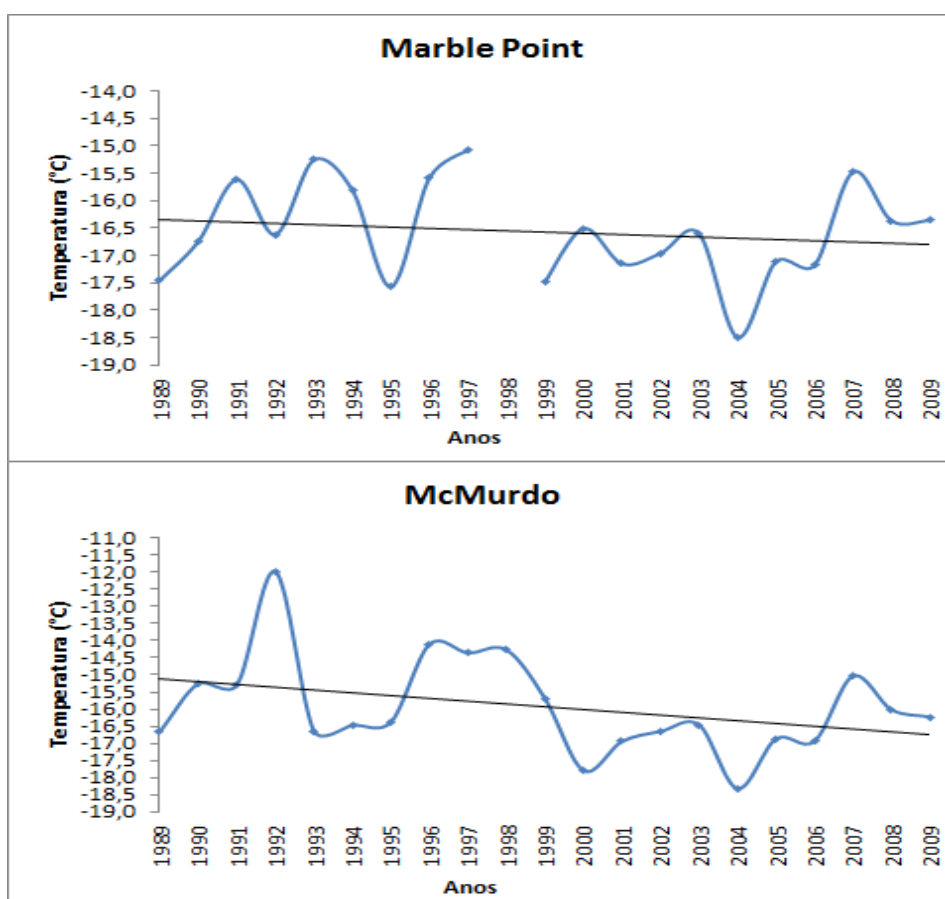
Um bom exemplo que retrata a grande variação de temperatura existente em pequena escala na região do Mar de Ross é citado por Monaghan et al. (2005) que demonstraram a influência da topografia no clima regional. Os autores observaram diferença significativa na temperatura de vários graus Celsius entre duas estações separadas apenas por 2 km de distância (Base Scott e McMurdo). Por meio da Tabela 11 e da Figura 20, verifica-se que para o período estudado (1989-2009), as estações apresentaram tendências: McMurdo com tendência de resfriamento e Marble Point com tendência de aquecimento. No presente estudo a estação Scott não foi utilizada por

apresentar muitas falhas para o período analisado, assim foi decidido optar por estações com série de dados mais completas.

Tabela 11 - Análise de significância da tendência anual e sazonal da temperatura do ar (°C) para as estações do setor Mar de Ross

Estação	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
McMurdo	-1,12	0,81	-0,75	-0,87	-2,17*
Marble Point	-0,03	-0,18	-0,36	-0,45	0,48

Nota: Valores em negrito e com (*) são estatisticamente significativos a 5%.



Nota: Os gráficos estão em escala diferentes para melhor visualização.

Figura 20 - Variação média anual da temperatura do ar (°C) em superfície entre 1989 a 2009 para as estações no setor do Mar de Ross e tendência linear das séries.

3.4.1. Verão (DJF)

Analisando dados de estações automáticas durante o período de 1986-2000, Doran et al. (2002) observaram que ocorreu resfriamento significativo na região de McMurdo durante o verão. Analisando período mais recente, presente estudo, observa-se que o verão foi o único período na estação de McMurdo que apresentou pequena tendência de aquecimento. A análise estatística realizada e conforme está apresentada na Tabela 1D do Apêndice e Figura 21, indicam que as reanálises apresentam desempenho pouco satisfatório para o verão na região do Mar de Ross, todos os índices foram muito baixos. Vale ressaltar que para a estação de Marble Point as reanálises do NCEP-NCAR e ERA-Interim subestimaram, de forma geral, a temperatura do ar em relação ao observado.

3.4.2. Outono (MAM)

No outono austral, as estações apresentam pequena tendência de resfriamento (Tabela 11). Se comparado ao verão, o outono apresenta condições meteorológicas com menor variabilidade, mas assim como no verão, grandes interações meteorológicas ocorrem entre o sistema oceano-terra-atmosfera (MONAGHAN et al., 2005). O verão e o outono na região do Mar de Ross são caracterizados por processos meteorológicos muito semelhantes, como aumento da pressão, da precipitação e da nebulosidade. Em contrapartida, ocorre diminuição da velocidade do vento e diminuição também do gelo permanente (MONAGHAN et al., 2005).

Bertler et al. (2004) sugerem que o resfriamento que ocorre na região do Mar de Ross durante o verão e o outono é associado as alterações controladas pelo ENSO na circulação atmosférica. Pela Figura 22 e Tabela 2D do Apêndice, nota-se que as reanálises apresentam desempenho muito fraco devido a grande variação da temperatura. Os índices calculados foram também mais baixos se comparados com os obtidos no verão.

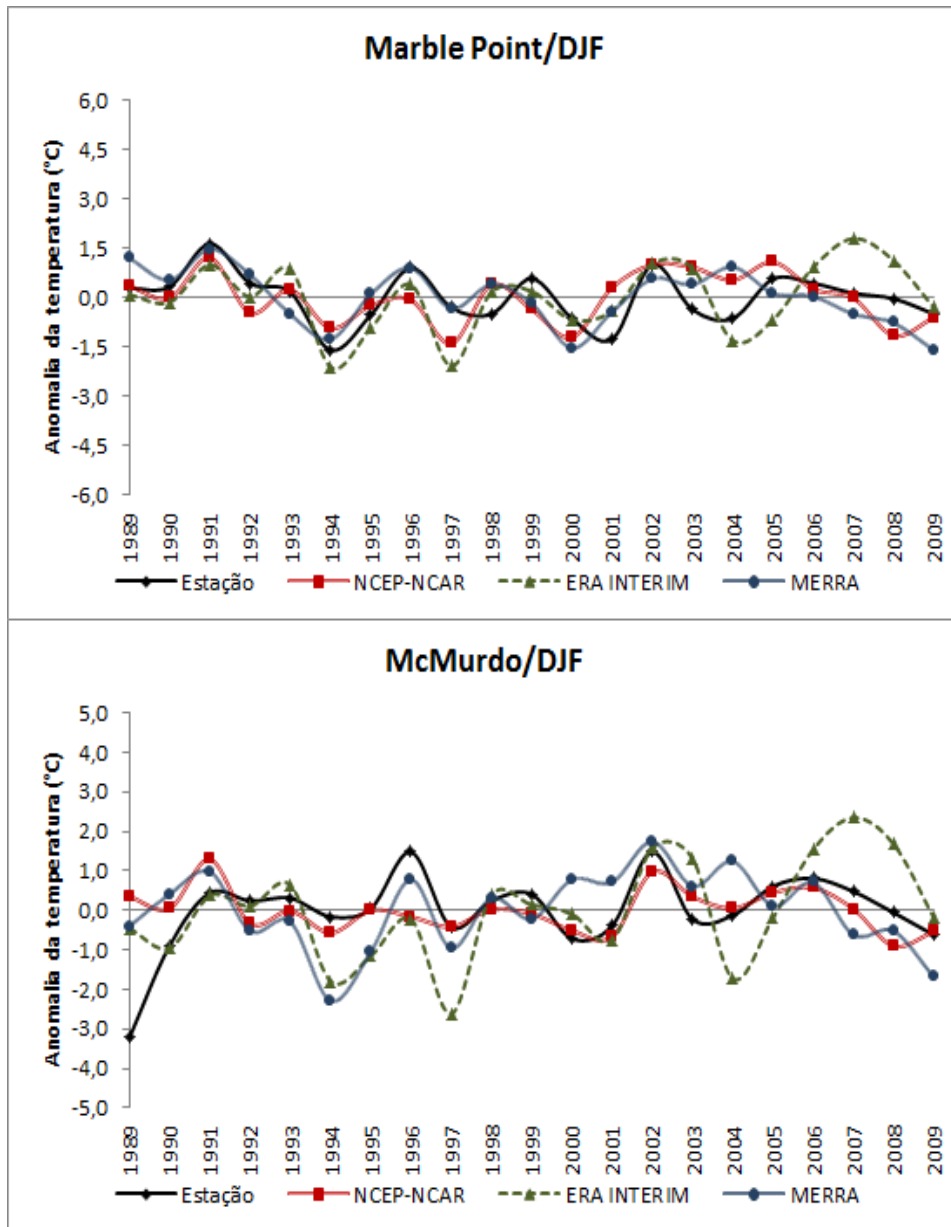


Figura 21 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Mar de Ross e reanálises para o verão (DJF).

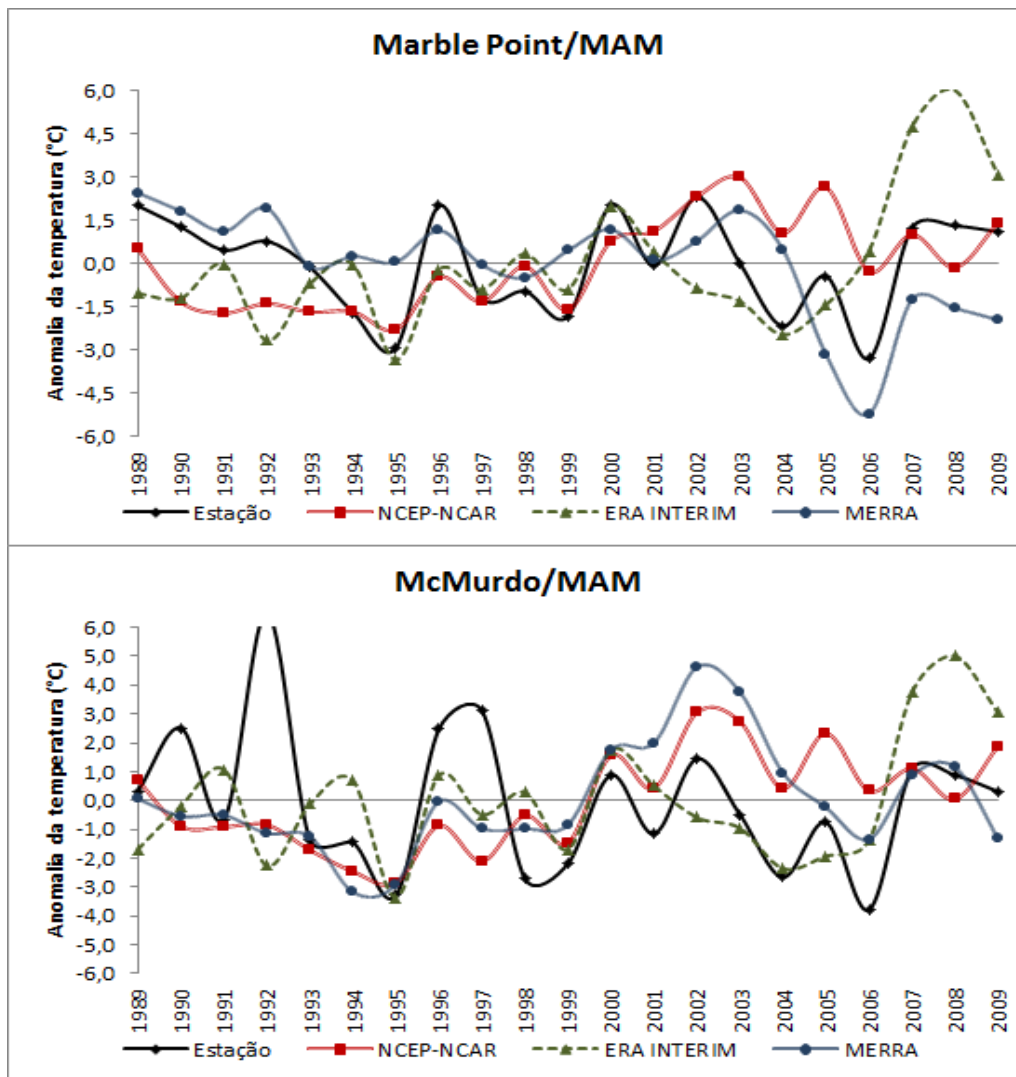


Figura 22 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Mar de Ross e reanálises para o outono (MAM).

3.4.3. Inverno (JJA)

O inverno nesta região é caracterizado por apresentar mudança nos padrões climatológicos, é neste período que começa a ocorrer aumento no congelamento do gelo permanente, a velocidade do vento começa a aumentar e a nebulosidade começa a diminuir (MONAGHAN et al., 2005).

Neste período os ventos na região do Mar de Ross são de origem catabáticos fazendo com que a temperatura diminua drasticamente, favorecendo ciclogênese na região. É durante o inverno que forte gradiente de

temperatura meridional aparece dentro da região do Mar de Ross em apenas algumas dezenas de quilômetros, como consequência destes ventos catabáticos (BROMWICH e PARISH, 2002).

Com base nos resultados da Tabela 11, as variações da temperatura para o Mar de Ross não foram significativas, com as estações de McMurdo e Marble Point apresentando tendências de resfriamento. A Tabela 3D do Apêndice demonstra esse resultado obtido pelas reanálises, é interessante notar que as reanálises subestimaram consideravelmente a temperatura nas duas estações observadas.

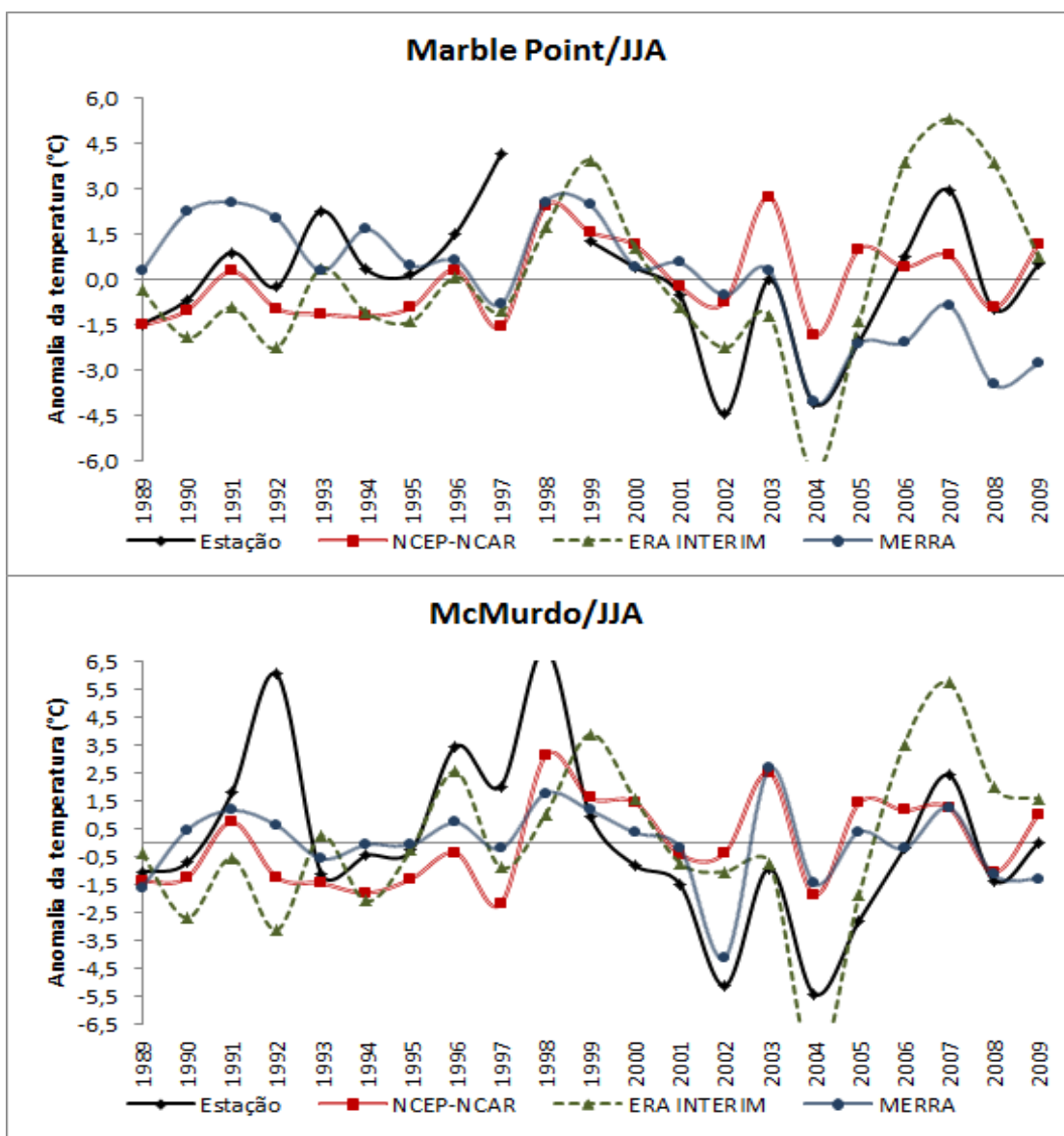


Figura 23 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Mar de Ross e reanálises para o inverno (JJA).

3.4.4. Primavera (SON)

Os meses de primavera na região do Mar de Ross são caracterizados por pouca nebulosidade (BROMWICH et al., 2005). Outro fator importante recorrente é a diminuição da pressão atmosférica, que é resultado das migrações meridionais dos sistemas sinóticos atuantes no continente Antártico (MONAGHAN et al., 2005). Kejna (2003) e Doran et al. (2002), durante o período de 1986-2000, encontraram tendência de aquecimento considerável na região da estação McMurdo, mas não significativo. Ao analisar a Tabela 11, verifica-se resfriamento significativo a 5% para McMurdo, e as reanálises apresentaram o pior desempenho de todos os resultados gerados na Antártica, principalmente na estação McMurdo (Tabela 12). Novamente é importante lembrar que o período da série de dados avaliados no estudo difere das séries utilizadas nos estudos anteriores o que certamente produz resultados distintos. Isto comprova ainda mais a relevância do estudo aqui conduzido.

Tabela 12 - Resultados da análise estatística dos valores das reanálises com os valores obtidos nas estações do Mar de Ross durante a primavera (SON)

	MBE	RMSE	r^2	R	D	C
Marble Point						
NCEP/NCAR	0,211	1,265	0,171	0,414	0,629	0,260
ERA-Interim	0,177	1,053	0,334	0,578	0,757	0,438
MERRA	0,156	1,250	0,140	0,374	0,628	0,235
McMurdo						
NCEP/NCAR	0,000	1,868	0,013	-0,112	0,332	-0,037
ERA-Interim	0,002	1,635	0,004	0,061	0,428	0,026
MERRA	-0,0005	1,678	0,0002	0,015	0,411	0,006

Durante o inverno e primavera os processos são contrários aos que acontecem durante o verão e outono. A grande influência do gelo marinho e permanente que serve como condição de contorno e inicial para as reanálises, contribui significativamente para que estas obtenham desempenho indesejado. Os processos climáticos envolvidos com o gelo marinho são extremamente complexos e difíceis de serem parametrizados nos modelos climáticos. Porém, outro fator que pode somar para o mau desempenho das reanálises são as muitas falhas no período observado, neste sentido são resultados que devem ser analisados com cuidado, como no caso da estação McMurdo para o período da primavera.

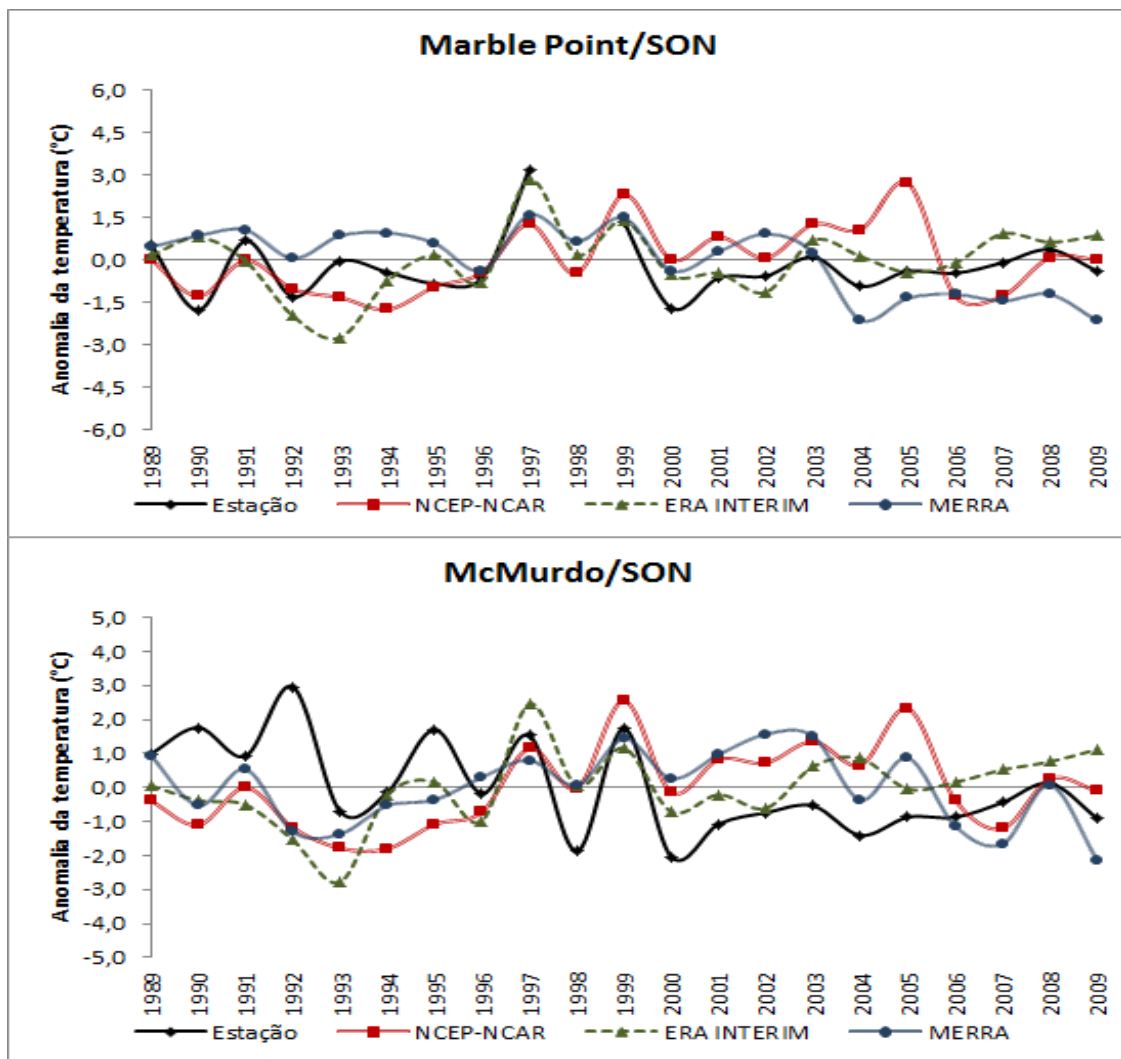


Figura 24 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor do Mar de Ross e reanálises para a primavera (SON).

3.5. Setor continental

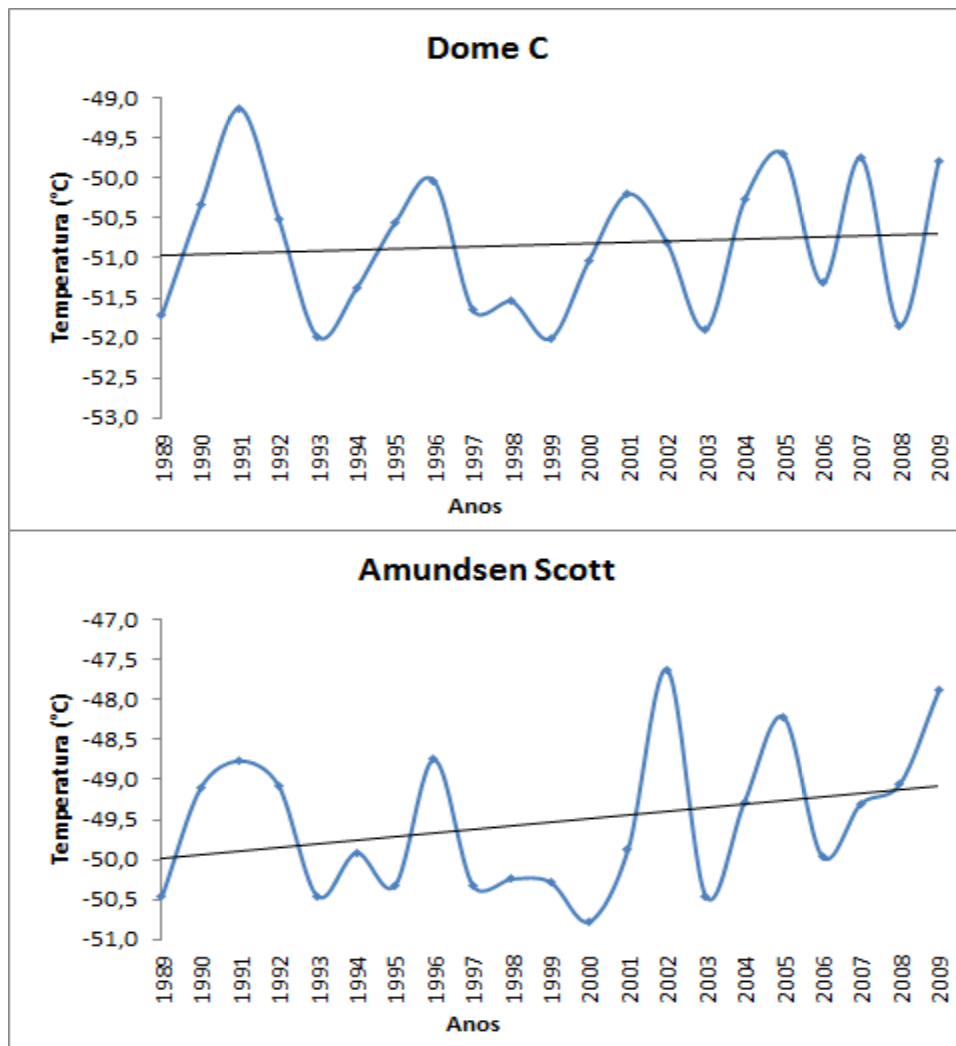
O interior do continente Antártico caracteriza-se por considerável estabilidade nas condições da temperatura. As alterações anuais geralmente são menores do que no setor costeiro do continente (KEJNA, 2003). Apesar desta aparente estabilidade, Kejna (2003) sugere que a temperatura no pólo sul diminuiu consideravelmente se comparada com a média entre os anos de 1968-2000, em torno de $-0,21^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Turner et al. (2005), analisando os dados de velocidade dos ventos na estação de Amundsen Scott entre 1958-2000, demonstraram tendência de diminuição significativa. Adicionalmente, neste mesmo período ocorreu resfriamento não significativo na temperatura média anual de $-0,05^{\circ}\text{C}$.

Tabela 13 - Análise de significância da tendência anual e sazonal da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) para as estações do setor Continental

Estação	Anual	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Dome C	0,57	1,69	0,33	-0,24	-1,3
Amundsen Scott	1,42	0,6	2,36*	-1,11	0,93

Valores em negrito e com (*) são estatisticamente significativos a 5%.

Analisando a Tabela 13 conclui-se que para o período estudado, as duas estações apresentaram pequena tendência de aquecimento sendo a estação de Amundsen Scott apresentando tendência maior. Essa tendência é confirmada pela Figura 25 que indica tendência positiva de aquecimento, mas esta figura deve ser analisada com cuidado, pois as duas estações apresentaram tendência de resfriamento para primeira década (1989-1999). O aquecimento ocorrido na segunda década é superior ao resfriamento da primeira (não indicado), assim na tendência para todo o período o aquecimento se impõe. Atribui-se este aquecimento à redução na camada de ozônio e assim a maior penetração da radiação de ondas curtas proveniente do sol (THOMPSON; SOLOMON, 2002).



Nota: Os gráficos estão em escala diferentes para melhor visualização.

Figura 25 - Variação média anual da temperatura do ar (°C) em superfície entre 1989 a 2009 para as estações no setor Continental e tendência linear das séries.

3.5.1. Verão (DJF)

Analisando dados derivados de satélites e comparando com as observações realizadas em estações automáticas, Comiso (2000) encontrou tendências de resfriamento na maior parte do lado oriental do platô Antártico durante o período de 1979-1998, onde estão localizadas as duas estações Dome C e Amundsen Scott. Estes resultados encontrados por Comiso (2000) são consistentes com os encontrados por Thompson e Solomon (2002).

De acordo com Comiso (2000), verões relativamente frios no continente são seguidos por invernos relativamente quentes e vice-versa. Durante as duas décadas estudadas pelo autor, os verões apresentaram tendência de serem mais frios que a média. Apesar de a Tabela 13 e de a Figura 26 apresentarem pequena tendência de aquecimento para o período, de forma geral, a década de 1990 foi caracterizada por tendência de resfriamento nas duas estações, somente na última década em estudo (anos 2000) que a tendência foi de aquecimento superior a 1°C no caso de Amundsen Scott. De modo geral, Dome C apresenta valores maiores, porém não são significativos.

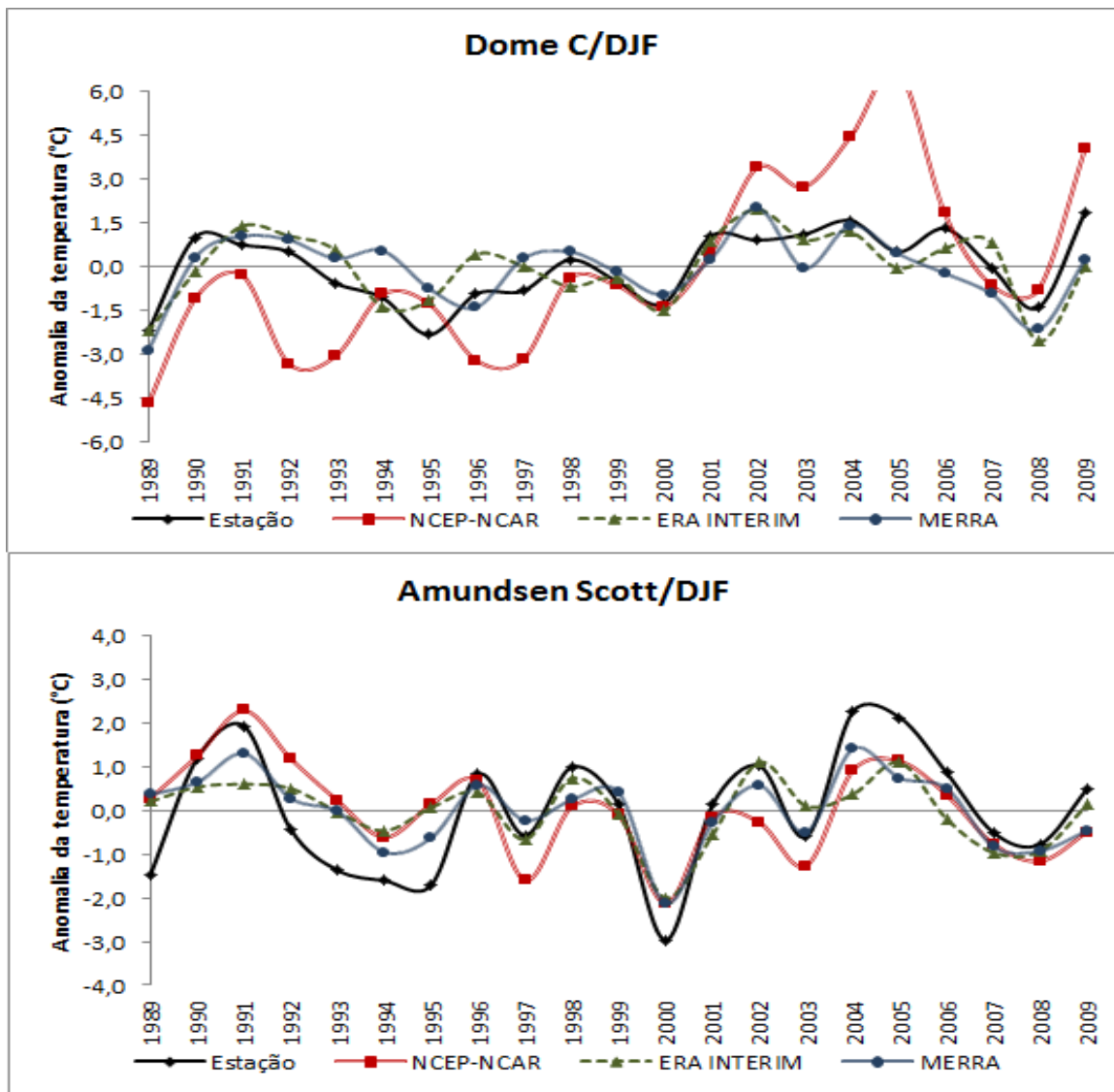


Figura 26 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor Continental e reanálises para o verão (DJF).

Como as estações estão localizadas na região central do continente, com altitude considerável, a influência de massas de ar de origem marítima é enfraquecida. Os processos que dominam o clima no platô Antártico são de origem radiativa e envolvem parametrizações complexas que incluem a interação entre ondas longas/curtas e inversões térmicas (JUSTINO et al., 2010). Isto está intimamente ligado à cobertura de nuvens. Estas são algumas das razões que fazem as reanálises apresentarem dificuldades na exatidão dos resultados propostos a partir das observações. A Tabela 1E do Apêndice indica que as reanálises obtiveram RMSE alto e os índices “r²” e “c” baixos, concluindo que os valores encontrados pelas reanálises variam muito em relação ao observado e representam pouco a variação de acordo com os dados observados, apesar dos valores de “d” e “r” serem satisfatórios, onde o coeficiente “r” foi considerado como correlação alta. Outro detalhe interessante é a subestimativa da temperatura pelas reanálises na estação Dome C (MBE negativo).

3.5.2. Outono (MAM)

Kejna (2003), analisando os dados da estação russa de Vostok, localizada entre as estações de Amundsen Scott e Dome C, encontrou considerável resfriamento entre as décadas de 1980 e 1990.

Para as reanálises somente a reanálise do MERRA apresentou resultado satisfatório (Figura 27 e Tabela 14), apesar do RMSE alto, os valores de “r²” e “d” terem sido bons, o que demonstra a exatidão dos valores estimados pela reanálise. Com coeficiente de correlação “r” significativo, admite-se que a reanálise obteve bom desempenho, quando comparado com ao ERA-Interim e NCEP-NCAR.

Ao analisar a Tabela 13, observa-se que a estação de Amundsen Scott apresenta tendência significativa em nível de 5% de aquecimento, o que reforça a tendência de aquecimento para a região na última década. A estação Dome C apresentou tendência de aquecimento, mas não estatisticamente significativa.

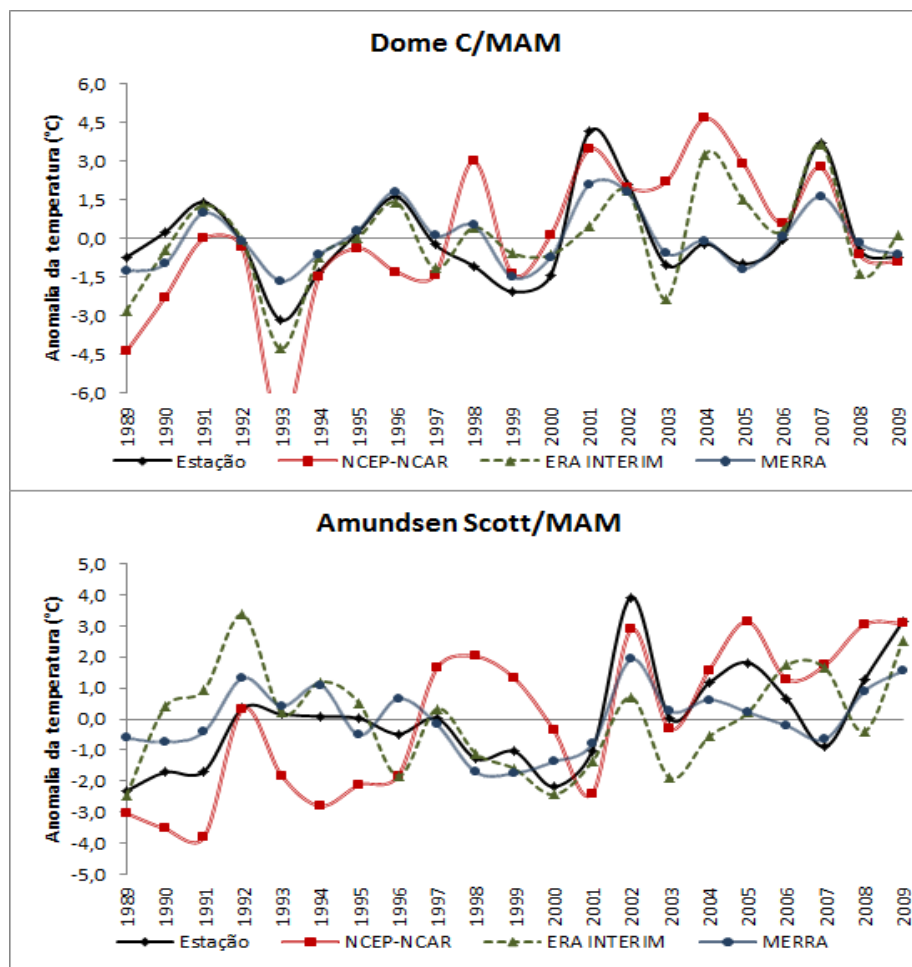


Figura 27 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor Continental e reanálises para o outono (MAM).

Tabela 14 - Resultados da análise estatística dos valores das reanálises com os valores obtidos nas estações do setor Continental durante o outono (MAM)

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Amundsen Scott						
NCEP/NCAR	-0,0005	1,759	0,430	0,656	0,778	0,510
ERA-Interim	0,0005	1,611	0,229	0,479	0,687	0,329
MERRA	0,0005	0,995	0,631	0,794	0,839	0,666
Dome C						
NCEP/NCAR	0,000	2,384	0,247	0,497	0,671	0,333
ERA-Interim	-0,0005	1,502	0,413	0,643	0,792	0,509
MERRA	0,001	0,903	0,786	0,887	0,894	0,793

3.5.3. Inverno (JJA)

O inverno no interior do continente Antártico possui característica bastante peculiar que é o fato de que geralmente invernos frios serem seguidos por verões quentes. Durante as décadas de 1980 e 1990 ocorreu alternância entre invernos quentes e frios (COMISO, 2000). Jones et al. (1999) encontraram anos relativamente quentes na década de 1990 (1995, 1997 e 1998). Observando a Tabela 13, a tendência de resfriamento é encontrada para as duas estações.

Por meio da Figura 28, verifica-se o resultado das reanálises, apesar do inverno no interior Antártico ser caracterizado por diminuição na nebulosidade, o que de certa forma facilita a obtenção das imagens de satélites e por consequência melhora o desempenho das reanálises. Algumas discrepâncias são encontradas nos resultados do NCEP-NCAR que apresentou fraco rendimento se comparados aos dados das estações. O ERA-Interim e o MERRA apresentaram melhores resultados para as duas estações (Tabela 2E do Apêndice).

O ERA-Interim subestimou a temperatura nas duas estações, enquanto o MERRA somente em Dome C. Os valores dos índices encontrados são sempre para o ERA-Interim são inferiores aos do MERRA. O MERRA na estação Dome C obteve valores muito bons, principalmente em relação aos índices de concordância, confiança e o coeficiente de correlação.

3.5.4. Primavera (SON)

Kejna (2003) observou que durante a primavera, a tendência da temperatura passou de positiva para negativa, na região das estações de Vostok e Dome C. O autor encontrou reduções nas temperaturas (Vostok - 0,56°C/década e Dome C -0,28°C/década). Pela Tabela 13, nota-se que para a estação Dome C a tendência de resfriamento, enquanto a estação Amundsen Scott apresentou pequena tendência de aquecimento embora não são significativas em ambos os casos.

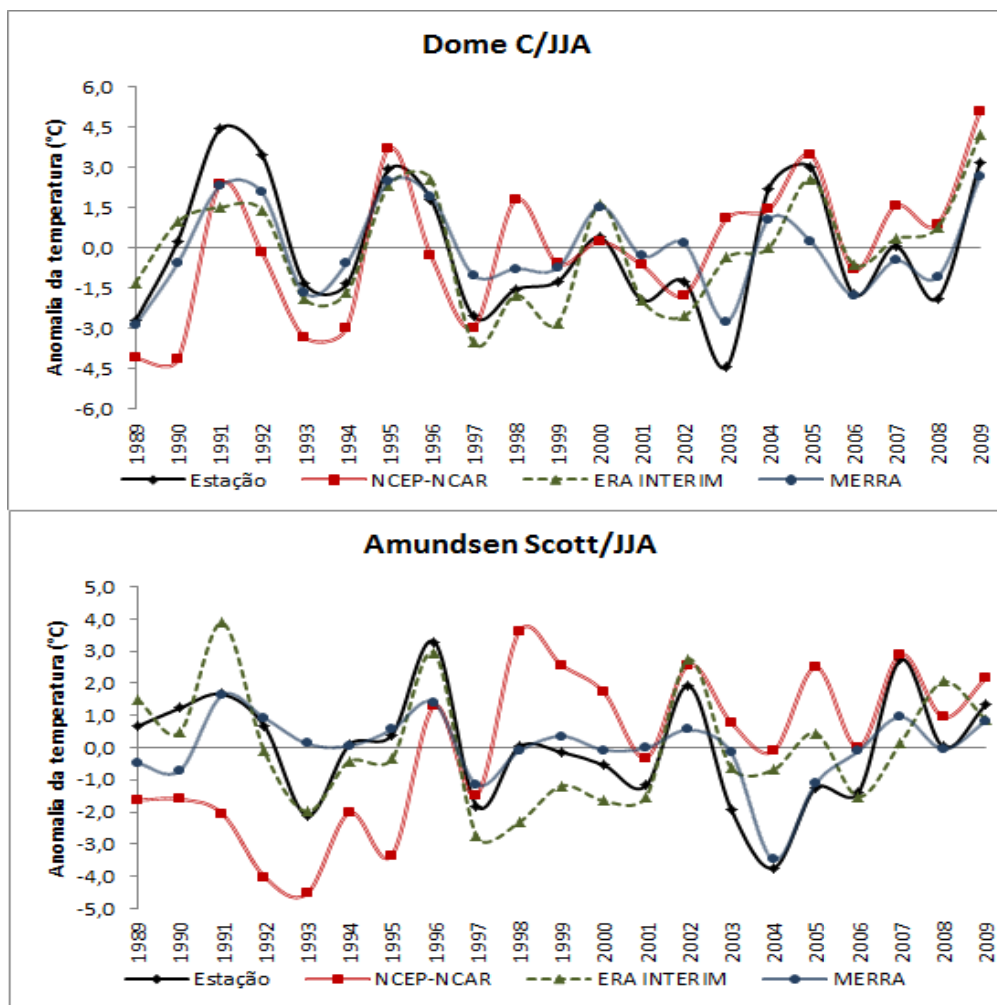


Figura 28 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor continental e reanálises para o inverno (JJA).

Pela Figura 29, observa-se que o desempenho do MERRA foi muito superior que as outras duas reanálises. O MERRA obteve desempenho bom (valor de “c”), com correlação muito alta “r” e com valores de “d” e “r²” significativos. Isto comprova o bom desempenho da reanálise na região continental da Antártica.

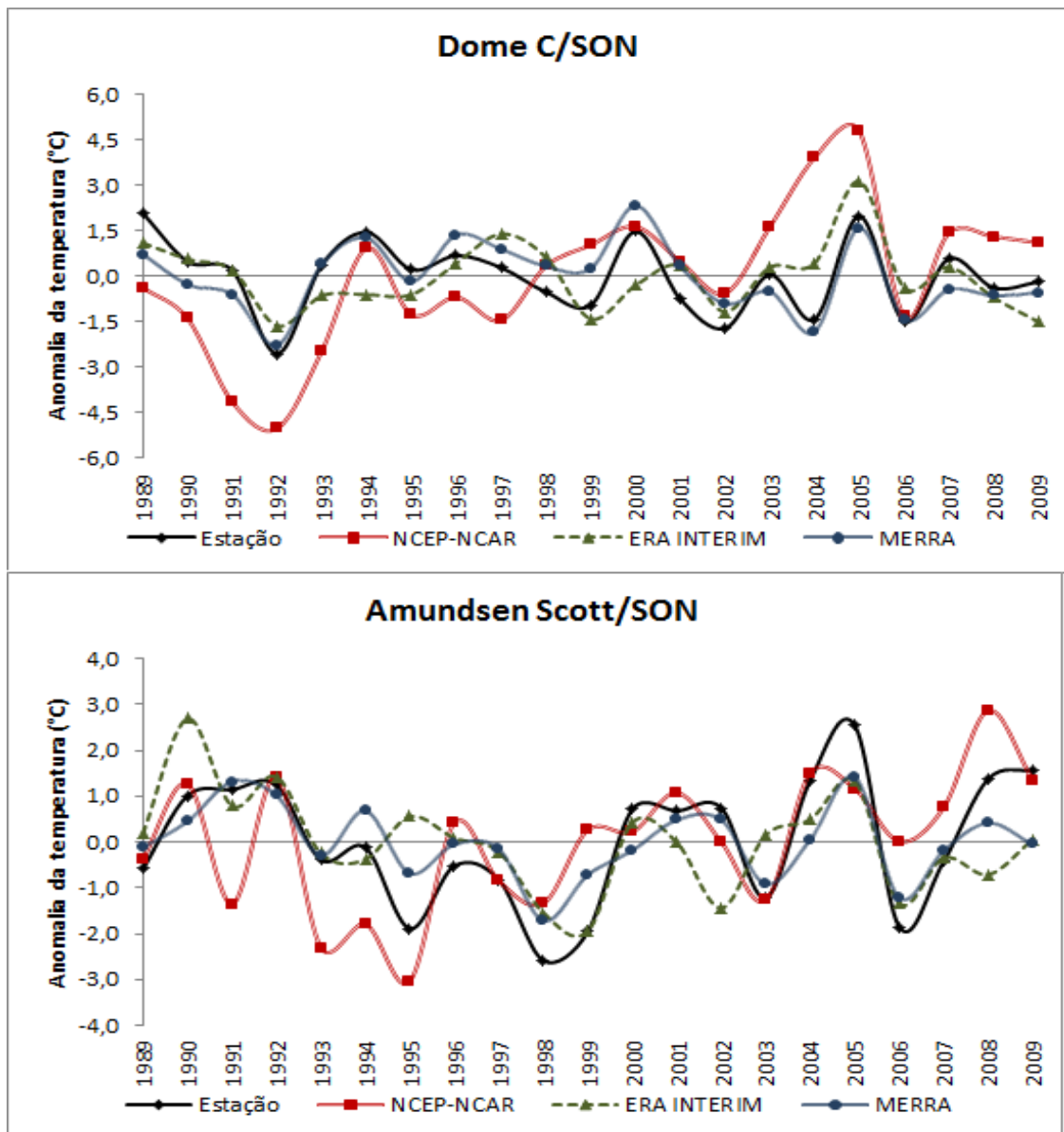


Figura 29 - Anomalias da temperatura (°C) para as estações do setor continental e reanálises para a primavera (SON).

4. CONCLUSÕES

Após a análise por regiões da Antártica, ficou claro que o continente passou por mudanças de temperatura do ar em superfície durante o período de 1989 a 2009. A grande porção do continente apresenta tendência de aquecimento na última década, entre 1989-1999 apenas o lado ocidental e a Península Antártica indicavam tendência de aquecimento.

A Península Antártica e as Shetland do Sul apresentaram variação no padrão de tendência da temperatura, enquanto a primeira década foi marcada por forte tendência de aquecimento, na segunda década do estudo as estações localizadas nas Ilhas Shetland do Sul apresentaram tendência de resfriamento. O lado oeste da Península foi a exceção, a estação Rothera continuou com tendência de aquecimento assim como já proposto em estudos realizados anteriormente. Quando comparado ao proposto pelas reanálises, nota-se que do lado oeste da Península, o desempenho das reanálises foi baixo, o ERA-Interim foi a reanálise que obteve as melhores correlações com os dados observados na estação Rothera.

No setor do Mar de Weddell, por influência do Mar de Weddell, a estação de Halley apresentou tendências um pouco diferentes em relação às outras duas estações. Com forte tendência de resfriamento na primeira parte da série, passou para forte tendência de aquecimento na segunda parte. O verão foi marcado por apresentar tendência significativa de aquecimento, o que contribuiu muito para o resultado final de aquecimento nesta segunda parte do período em análise. As reanálises que se destacaram na região apresentando bons resultados quando comparados às observações foi o MERRA e o NCEP-NCAR, a primeira se destacando para o período outono-inverno e a segunda para o período primavera-verão.

As estações de Neumayer e Novolazarevskaya que estão localizadas na região costeira do oceano Índico, apresentaram tendências diferentes entre si na primeira década, enquanto Neumayer indicou tendência de aquecimento para todo o período, Novolazarevskaya apresentou mudança de resfriamento para aquecimento. A última estação citada obteve tendência significativa de resfriamento no verão.

O setor do oceano Pacífico talvez seja a região que apresenta resultados distintos se comparado aos estudos realizados em períodos anteriores. E até mesmo dentro da própria região os resultados foram discrepantes, a estação Mirny indicou tendência de aquecimento significativo para todo o período, enquanto as demais estações a tendência não foi significativa. Vale ressaltar que essa tendência de aquecimento ocorreu na segunda metade do período avaliado. Na década de 90 a tendência de resfriamento prevaleceu para toda a região. O principal período de mudança na

tendência foi o outono, enquanto autores (por exemplo: Kejna (2003) e Steig et al. (2009) encontraram tendências de resfriamento, neste estudo a tendência foi de aquecimento significativo para quase todas as estações, menos para Casey, onde ocorreu aquecimento, mas não significativo.

Para o setor do Mar de Ross, a tendência da temperatura do ar próximo a superfície foi significativa unicamente na estação McMurdo durante a primavera. Na região do Mar de Ross a reanálise do NCEP-NCAR não obteve bom desempenho, as suas correlações com os dados das estações sempre foram inferiores as outras reanálises. Da mesma forma, os valores encontrados para as correlações entre as reanálises do MERRA e do ERA-Interim não foram satisfatórios.

Não diferente das outras regiões do continente antártico, a região central também apresentou tendência de aquecimento durante o período analisado. Os resultados mostram tendência de resfriamento na primeira década, mudando posteriormente. O maior aquecimento ocorreu durante o outono, onde até então era caracterizado por tendência de resfriamento em décadas anteriores, principalmente na estação Amundsen Scott. Em se tratando de reanálises, o MERRA apresentou resultados muito superiores em relação às outras reanálises, nesta região do continente Antártico.

Em suma, a Antártica de forma geral apresenta processo de mudança no padrão da temperatura em superfície, passando de tendência de resfriamento para aquecimento, a exceção ficou por parte da região norte da Península Antártica, nas Ilhas Shetland do Sul, onde estão localizadas as estações Bellingshausen e Ferraz. A comparação entre as observações e os dados de reanálises mostra que o MERRA apresenta melhor resultado para todas as estações de forma geral, principalmente para a região central do continente. O ERA-Interim apresentou dificuldades em alguns setores. O NCEP-NCAR apresentou rendimento inferior na parte central do continente e Mar de Ross, nas demais regiões apresentou bom rendimento.

A discussão apresentada nesta análise não teve a pretensão de abordar todos os assuntos pertinentes que envolvem o clima da Antártica, assim, ficam como sugestões de trabalhos futuros alguns pontos relevantes:

- Realizar simulações com modelos acoplados para o período analisado;

- Análises de outras variáveis meteorológicas (ex: pressão, velocidade e direção do vento, radiação, entre outras);
- Estudar em outros níveis atmosféricos a variação dos componentes meteorológicos;
- Acompanhar o desempenho de reanálises e modelos nos demais níveis atmosféricos;
- Utilização de imagens de satélites de órbitas polares;
- Correlacionar variações da temperatura em superfície com a temperatura do solo e permafrost.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACMEISTER, J.T.; SUAREZ, M.J.; ROBERTSON, F.R. Rain re-evaporation, boundary-layer/convection interactions and Pacific rainfall patterns in an AGCM. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, n. 12, p. 3383-3403, 2006.

BERRISFORD, P.; DEE, D.; FIELDING, K. et al. The ERA-Interim Archive. **ERA Report Series**, n. 1, p. 20, 2009.

BERTLER, N.A.N.; BARRETT, P.J.; MAYEWSKI, P.A. et al. El Niño suppresses Antarctic warming, **Geophysics Research Letters**, v. 31, L15207, doi 10.1029/2004GL020749, 2004.

BJERKNES, J. Atlantic air-sea interaction. **Advances in geophysics**. New York: Academic Press, 1964. v. 10, 82 p.

BOSILOVICH, M.G.; ROBERTSON, F.R.; MARYLAND, J.C.U. Global energy and water budgets in MERRA. **Journal of Climate**, v. 24, n. 22, p. 5721-5739, 2011.

BROMWICH, D.H. Mesoscale cyclogenesis over the southwestern Ross sea linked to strong katabatic winds, **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 1736-1752, 1991.

BROMWICH, D.H.; PARISH, T.R. **Scientific motivation for the Ross Island Meteorology Experiment (RIME)**. Columbus, OH: The Ohio State University, 2002. p. 14. (BPRC Miscellaneous Series, 425).

BROMWICH, D.H.; FOGT, R.L. Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR reanalyses in the high and midlatitudes of the southern hemisphere 1958-2001. **Journal of Climate**, v. 17, p. 4603-4619, 2004.

BROMWICH, D.H.; MONAGHAN, A.J.; POWERS, J.G.; MANNING, K.W. Real-time forecasting for the Antarctic: an evaluation of the Antarctic Mesoscale Prediction System (AMPS). **Monthly Weather Review**, v. 133, p. 579-603, 2005.

BROMWICH, D.H.; FOGT, R.L.; HODGES, K.I.; WALSH, J.E. A tropospheric assessment of the ERA-40, NCEP, and JRA-25 global reanalyses in the polar regions, **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-21, 2007.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARRASCO, J.F.; BROMWICH, D.H. Climatological aspects of mesoscale cyclogenesis over the Ross sea and Ross ice shelf regions of Antarctica. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2405-2425, 1994.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer, **Journal of Climate**, v. 18, p. 702-718, 2005.

CAVALIERI, D.J.; GLOERSEN, P.; PARKINSON, C.L. et al. Observed hemispheric asymmetry in global sea ice changes, **Science**, v. 278, p. 1104-1106, 1997.

CHAPMAN, W.L.; WALSH, J.E. A synthesis of Antarctic temperatures, **Journal of Climate**, v. 20, p. 4096-4117, 2007.

COMISO, J.C. Variability and trends in Antarctic surface temperatures from in situ and satellite infrared measurements, **Journal of Climate**, v. 13, p. 1674-1696, 2000.

DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553-597, 2011.

DORAN, P.T.; PRISCU, J.C.; LYONS, W.B.; et al. Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. **Nature**, v. 415, p. 517-520, 2002.

FARMAN, J.C.; GARDINER, B.G.; SHANKIN, J.D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal CClOx/NOx interaction. **Nature**, v. 315, p. 207-210, 1985.

FERRON, F.A. Variações nas razões de isótopos estáveis na neve e no gelo da Ilha Rei George, Antártica. 125 p. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

FERRON, F.A.; SIMÕES, J.C.; AQUINO, F.E.; SETZER, A.W. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 155-169, 2004.

FIFIELD, R. International research in the Antarctic. **Scientific Committee on Antarctic Research**, p. 146, 1987.

FLORINDO, F.; SIEGERT, M. Antarctic climate evolution. **Developments in Earth & Environmental Sciences**, v. 8, p. 606, 2009.

FYFE, J.C.; SAENKO, O.A.; ZICKFELD, K.; et al. The role of poleward intensifying winds on Southern Ocean warming, **Journal of Climate**, v. 20, p. 5391-5400, 2007.

GIBSON, J.K.; KALLBERG, P.; UPPALA, S.; et al. **ERA description**. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 1997. 72 p. (ECMWF ERA-15 Project Report Series, 1).

HEYWOOD, K.J.; NAVEIRA-GARABATO, A.C.; STEVENS, D.P.; MUENCH, R.D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. 1-13, 2004.

HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient**. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 01 nov. 2011.

JACKA, T.H.; BUDD, W.F. Detection of temperature and sea ice extent changes in the Antarctic and Southern Ocean. In: WELLER, G.; WILSON, C.L.; SEVERIN, B.A. **Proceedings of the International Conference on the Role of the Polar Regions in Global Change**. Fairbanks: University of Alaska, 1990. p. 63-70.

JACKA, T.H.; BUDD, W.F. Detection of temperature and sea-ice-extent changes in the Antarctic and Southern Ocean, 1949-1996. **Annals of Glaciology**, v. 27, p. 553-559, 1998.

JACOBS, S.S.; COMISO, J.C. Climate variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas. **Journal of Climate**, v. 10, p. 697-709, 1997.

JONES, P.D. Antarctic temperatures over the present century: a study of the early expedition record. **Journal of Climate**, v. 3, n. 11, p. 1193-1203, 1990.

JONES, P.D. Recent variations in mean temperature and the diurnal temperature range in the Antarctic. **Geophysics Research Letters**, v. 22, p. 1345-1348, 1995.

JONES, P.D.; NEW, M.; PARKER, D.E. et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years, **Review of Geophysics**, v. 37, p. 173-199, 1999.

JONES, J.M.; WIDMANN, M. Early peak in Antarctic oscillation index, **Nature**, v. 432, p. 290-291, 2004.

JUSTINO, F.B.; PELTIER, R. Climate anomalies induced by the Arctic and Antarctic Oscillations: Glacial Maximum and present-day perspectives. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3 p. 459-475, 2008.

JUSTINO, F.; SETZER, A.; BRACEGIRDLE, T.J. et al. Harmonic analysis of climatological temperature over Antarctica: present day and greenhouse warming perspectives. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 514-530, 2010.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R. et al. The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n.3, p. 437-471, 1996.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J. et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 1631-1643, 2002.

KARL, T.R.; KNIGHT, R.W. Global and hemispheric temperature trends: Uncertainties related to inadequate spatial sampling. **Journal of Climate**, v. 7, p. 1144-1163, 1994.

KEJNA, M. Trends in air temperature of the Antarctic during the period 1958-2000. **Polish Polar Research**, v. 24, n. 2, p. 99-128, 2003.

KING, J.C. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula, **International Journal of Climatology**, v. 14, p. 357-369, 1994.

KING, J.C.; HARANGOZO, S.A. Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. **Annals of Glaciology**, v. 27, p. 571-575, 1998.

KING, J.C.; TURNER, J. Antarctic meteorology and climatology. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 409 p.

KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W. et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 2, p. 247-267, 2001.

LOAGUE, K.; GREEN, R.E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application, **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.

MARSHALL, G.J. Trends in Antarctic geopotential height and temperature: A comparison between radiosonde and NCEP-NCAR reanalysis data, **Journal of Climate**, v. 15, p. 659-674, 2002.

MARSHALL, G.J.; ORR, A.; VAN LIPZIG, N.P.M.; KING, J.C. The impact of a changing southern hemisphere annular mode on Antarctic Peninsula summer temperatures, **Journal of Climate**, v. 19, p. 5388-5404, 2006.

MONAGHAN, A.J.; BROMWICH, D.H.; POWERS, J.G.; MANNING, K.W. The climate of the McMurdo, Antarctica, region as represented by one year of forecasts from the Antarctic mesoscale prediction system, **Journal of Climate**, v. 18, p. 1174-1189, 2005.

ONOGI, K.; TSUTSUI, J.; KOIDE, H. et al. The JRA-25, reanalysis. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85, n. 3, p. 369-432, 2007.

RAPER, S.C.; WIGLEY, T.M.; JONES, P.D.; SALINGER, M.J. Variations in surface air temperatures: part 3. The Antarctic, 1957-1982. **Monthly Weather Review**, v. 112, p. 1341-1353, 1984.

RIENECKER, M.M.; SUAREZ, M.J.; TODLING, R. et al. The GEOS-5 data assimilation system – documentation of versions 5.0.1, 5.1.0 and 5.2.0. **NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation**, v. 27, p. 92, 2008.

RIENECKER, M.M.; SUAREZ, M.J.; GELARO, R. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. **Journal of Climate**, v. 24, p. 3624-3648, 2011.

SCHUBERT, S.D.; ROOD, R.B.; PFAENDTNER, J. An assimilated dataset for earth science applications, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 74, p. 2331-2342, 1993.

SCHWERDTFEGER, W. Weather and Climate of the Antarctic. **Developments in Atmospheric Sciences**, v. 15, p. 261, 1984.

SCHWERDTFEGER, W.; AMATURO, L.R. Wind and weather around the Antarctic Peninsula. Madison: University of Wisconsin, 1979. 65 p.

SETZER, A. Variações climáticas regionais. In: BRASIL. Ministério da Educação e Cultura. **O Brasil e o meio ambiente Antártico**. Brasília, 2006. P. 24-26. (Coleção Explorando o Ensino, 10)..

SETZER, A.; KAYANO, M. Limitações das reanálises para altas latitudes do hemisfério sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 254-261, 2009.

SETZER, A.; ROMÃO, M. Atenção pesquisador: caiu a temperatura nos últimos 11 anos em Ferraz. In: SPA, 16, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Instituto de Geociências/USP, 2008.

SHUMAN, C.A.; STEARNS, C.R. Decadal-length composite inland West Antarctic temperature records. **Journal of Climate**, v. 14, p. 1977-1988, 2001.

SIMMONDS, I.; JACKA, T.H. Relationships between the interannual variability of Antarctic sea ice and the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 8, p. 637-647, 1995.

SMITH, R.C.; STAMMERJOHN, S.E.; BAKER, K.S. Surface air temperature variations in the Western Antarctic Peninsula Region. In: ROSS, R.M. et al. (Eds.). **Foundations for ecological research west of Antarctic Peninsula**. 1996. p. 104-121. (Antarctic Research Series, 70).

STARK, P. Climate warming in the central Antarctic Peninsula area. **Weather**, v. 49, p. 215-220, 1994.

STEIG, E.J.; SCHNEIDER, D.P.; RUTHERFORD, S.D. et al. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. **Nature**, v. 457, p. 459-463, 2009.

THOMPSON, D.W.J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, v. 296, p. 895-899, 2002.

THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J.M. Annular modes in the extratropical circulation: Part I: Month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000-1016, 2000.

TRÉMOLET, Y. Diagnostics of linear and incremental approximations in 4D-Var. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 130, p. 2233-2251, 2004.

TRENBERTH, K.E.; CARON, J.M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. **Journal of Climate**, v. 13, p. 4358-4365, 2001.

TURNER, J.; KING, J.C.; LACHLAN-COPE, T.A.; JONES, P.D. Recent temperature trends in the Antarctic. **Nature**, v. 418, p. 291-292, 2002.

TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J. et al. The SCAR READER project: towards a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2890-2898, 2004.

TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J. et al. Antarctic climate change during the last 50 years. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 279-294, 2005.

UPPALA, S.M.; KALLBERG, P.W.; SIMMONS, A.J. et al. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, n. 612, p. 2961-3012, 2005.

VAN DER BROEKE, M.R.; VAN LIPZIG, N.P.M. Changes in Antarctic temperature, wind and precipitation in response to the Antarctic Oscillation. **Annals of Glaciology**, v. 39, p. 119-126, 2004.

WILLMOTT, C.J.; AKLESON, G.S.; DAVIS, R.E. et al. Statistic for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

YUAN, X.; MARTINSON, D.G. Antarctic Sea Ice Extent Variability and Its Global Connectivity. **Journal of Climate**, v. 13, n. 10, p. 1697-1717, 2000.

6. APÊNDICES

6.1. Apêndice A

Tabela 1A - Outono

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	-0,001	0,551	0,843	0,918	0,949	0,871
ERA-Interim	0,001	0,521	0,838	0,915	0,952	0,871
MERRA	-0,001	0,417	0,867	0,931	0,960	0,893
Ferraz						
NCEP/NCAR	-0,102	0,598	0,916	0,957	0,960	0,919
ERA-Interim	-0,050	0,551	0,831	0,912	0,934	0,870
MERRA	-0,018	0,553	0,833	0,913	0,943	0,861
Rothera						
NCEP/NCAR	0,001	2,149	0,090	-0,300	0,262	-0,079
ERA-Interim	0,0005	1,133	0,754	0,868	0,835	0,725
MERRA	0,002	0,885	0,437	0,661	0,804	0,532

Tabela 2A - Inverno

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	-0,001	1,117	0,872	0,934	0,938	0,876
ERA-Interim	-0,003	0,923	0,776	0,881	0,922	0,812
MERRA	-0,003	0,343	0,972	0,986	0,992	0,978
Ferraz						
NCEP/NCAR	-0,228	1,681	0,464	0,681	0,816	0,556
ERA-Interim	-0,132	1,126	0,641	0,801	0,873	0,699
MERRA	-0,184	0,731	0,867	0,931	0,962	0,896
Rothera						
NCEP/NCAR	-0,002	3,490	0,0391	-0,197	0,246	-0,049
ERA-Interim	0,000	1,972	0,432	0,657	0,811	0,533
MERRA	-0,003	1,965	0,424	0,651	0,801	0,521

Tabela 3A - Primavera

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	-0,001	0,516	0,791	0,890	0,926	0,824
ERA-Interim	-0,001	0,664	0,394	0,628	0,768	0,428
MERRA	-0,002	0,393	0,797	0,893	0,944	0,842
Ferraz						
NCEP/NCAR	-0,053	0,787	0,386	0,396	0,778	0,489
ERA-Interim	-0,037	0,783	0,389	0,624	0,740	0,461
MERRA	-0,047	0,534	0,713	0,844	0,913	0,771
Rothera						
NCEP/NCAR	0,000	1,561	0,001	-0,035	0,381	-0,013
ERA-Interim	-0,001	0,989	0,358	0,589	0,751	0,449
MERRA	0,000	1,077	0,349	0,591	0,781	0,462

6.2. Apêndice B

Tabela 1B - Outono

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	0,009	0,633	0,541	0,736	0,837	0,616
ERA-Interim	-0,001	1,347	0,104	0,323	0,617	0,199
MERRA	0,021	0,697	0,482	0,694	0,833	0,578
Ferraz						
NCEP/NCAR	0,029	0,642	0,537	0,733	0,828	0,607
ERA-Interim	0,001	0,897	0,309	0,556	0,740	0,411
MERRA	0,006	0,608	0,668	0,817	0,810	0,662
Rothera						
NCEP/NCAR	0,015	0,458	0,657	0,810	0,866	0,702
ERA-Interim	0,000	1,119	0,097	0,311	0,563	0,175
MERRA	0,019	0,440	0,707	0,841	0,913	0,768

Tabela 2B - Inverno

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	0,001	1,476	0,487	0,698	0,816	0,570
ERA-Interim	-0,003	1,458	0,490	0,670	0,793	0,555
MERRA	-0,002	1,414	0,520	0,721	0,818	0,590
Ferraz						
NCEP/NCAR	0,001	1,288	0,495	0,704	0,818	0,575
ERA-Interim	-0,001	1,564	0,426	0,653	0,798	0,521
MERRA	0,002	1,749	0,154	0,392	0,603	0,237
Rothera						
NCEP/NCAR	-0,003	1,935	0,221	0,470	0,646	0,304
ERA-Interim	-0,001	1,460	0,391	0,625	0,766	0,479
MERRA	-0,003	0,772	0,770	0,878	0,929	0,815

Tabela 3B - Primavera

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Bellingshausen						
NCEP/NCAR	-0,005	0,816	0,592	0,770	0,870	0,670
ERA-Interim	-0,001	0,823	0,479	0,692	0,826	0,572
MERRA	-0,001	0,846	0,411	0,641	0,770	0,493
Ferraz						
NCEP/NCAR	0,002	0,887	0,561	0,750	0,861	0,645
ERA-Interim	0,003	1,233	0,171	0,414	0,587	0,243
MERRA	0,001	1,044	0,381	0,618	0,762	0,470
Rothera						
NCEP/NCAR	0,000	1,149	0,092	0,304	0,598	0,181
ERA-Interim	0,005	1,108	0,170	0,413	0,627	0,259
MERRA	-0,002	0,611	0,679	0,824	0,905	0,746

6.3. Apêndice C

Tabela 1C – Verão

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Mawson						
NCEP/NCAR	-0,004	0,501	0,596	0,772	0,866	0,668
ERA-Interim	0,001	0,954	0,236	0,485	0,667	0,324
MERRA	-0,011	0,483	0,645	0,803	0,895	0,719
Davis						
NCEP/NCAR	0,009	0,572	0,493	0,702	0,836	0,587
ERA-Interim	-0,007	0,555	0,525	0,725	0,848	0,615
MERRA	-0,012	0,411	0,799	0,894	0,869	0,777
Mirny						
NCEP/NCAR	-0,003	0,723	0,393	0,627	0,767	0,482
ERA-Interim	0,000	0,688	0,453	0,673	0,810	0,545
MERRA	-0,007	0,674	0,453	0,673	0,748	0,504
Casey						
NCEP/NCAR	-0,005	0,476	0,630	0,794	0,863	0,685
ERA-Interim	0,0005	0,752	0,384	0,620	0,785	0,487
MERRA	-0,004	0,572	0,484	0,695	0,751	0,522

Tabela 2C - Inverno

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Mawson						
NCEP/NCAR	-0,073	0,714	0,779	0,883	0,938	0,828
ERA-Interim	-0,113	1,191	0,656	0,810	0,874	0,708
MERRA	-0,016	1,076	0,490	0,700	0,824	0,577
Davis						
NCEP/NCAR	-0,021	1,178	0,675	0,822	0,904	0,743
ERA-Interim	-0,052	0,640	0,901	0,949	0,974	0,924
MERRA	0,022	1,025	0,749	0,866	0,914	0,791
Mirny						
NCEP/NCAR	0,000	1,116	0,682	0,826	0,900	0,743
ERA-Interim	0,000	1,032	0,671	0,819	0,900	0,738
MERRA	0,003	0,833	0,748	0,865	0,923	0,799
Casey						
NCEP/NCAR	-0,175	1,307	0,662	0,814	0,871	0,709
ERA-Interim	-0,113	1,178	0,579	0,761	0,864	0,657
MERRA	0,006	0,989	0,611	0,781	0,869	0,679

Tabela 3C - Primavera

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Mawson						
NCEP/NCAR	-0,078	0,642	0,593	0,770	0,851	0,655
ERA-Interim	-0,023	0,801	0,252	0,502	0,696	0,349
MERRA	0,006	0,447	0,669	0,818	0,901	0,737
Davis						
NCEP/NCAR	-0,047	0,803	0,583	0,764	0,866	0,661
ERA-Interim	0,018	0,852	0,381	0,617	0,756	0,467
MERRA	0,029	0,579	0,731	0,855	0,896	0,766
Mirny						
NCEP/NCAR	0,000	0,556	0,710	0,843	0,914	0,771
ERA-Interim	0,0005	0,730	0,496	0,704	0,795	0,560
MERRA	0,0005	0,599	0,668	0,817	0,878	0,717
Casey						
NCEP/NCAR	-0,155	0,650	0,756	0,870	0,928	0,807
ERA-Interim	-0,038	0,943	0,417	0,646	0,784	0,506
MERRA	-0,020	0,855	0,521	0,722	0,800	0,577

6.4. Apêndice D

Tabela 1D - Verão

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Marble Point						
NCEP/NCAR	-0,013	0,783	0,202	0,449	0,684	0,308
ERA-Interim	-0,015	0,830	0,352	0,594	0,741	0,440
MERRA	0,005	0,709	0,364	0,603	0,776	0,468
McMurdo						
NCEP/NCAR	0,010	0,968	0,054	0,233	0,453	0,106
ERA-Interim	0,011	1,254	0,129	0,359	0,537	0,193
MERRA	0,003	1,128	0,093	0,305	0,545	0,166

Tabela 2D - Outono

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Marble Point						
NCEP/NCAR	0,0005	1,842	0,112	0,334	0,593	0,198
ERA-Interim	0,0005	2,217	0,147	0,383	0,606	0,232
MERRA	0,0005	1,833	0,186	0,432	0,664	0,287
McMurdo						
NCEP/NCAR	0,042	2,812	0,005	0,071	0,403	0,029
ERA-Interim	0,042	2,835	0,039	0,196	0,494	0,070
MERRA	0,042	2,760	0,033	0,181	0,470	0,085

Tabela 3D - Inverno

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Marble Point						
NCEP/NCAR	-0,168	2,141	0,040	0,201	0,486	0,098
ERA-Interim	-0,133	2,294	0,295	0,543	0,719	0,391
MERRA	-0,179	2,324	0,090	0,300	0,561	0,168
McMurdo						
NCEP/NCAR	-0,110	2,924	0,075	0,273	0,514	0,140
ERA-Interim	-0,111	3,237	0,142	0,376	0,630	0,237
MERRA	-0,110	2,357	0,380	0,619	0,664	0,410

6.5. Apêndice E

Tabela 1E - Verão

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Amundsen Scott						
NCEP/NCAR	0,0005	1,022	0,442	0,664	0,797	0,530
ERA-Interim	-0,002	0,988	0,499	0,707	0,752	0,531
MERRA	0,007	0,811	0,697	0,835	0,855	0,713
Dome C						
NCEP/NCAR	-0,049	2,251	0,454	0,674	0,660	0,445
ERA-Interim	-0,001	0,870	0,533	0,730	0,850	0,620
MERRA	-0,46	0,932	0,458	0,677	0,816	0,552

Tabela 2E - Inverno

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Amundsen Scott						
NCEP/NCAR	0,000	2,598	0,040	0,200	0,483	0,097
ERA-Interim	-0,001	1,417	0,442	0,665	0,801	0,533
MERRA	0,000	1,116	0,580	0,762	0,820	0,625
Dome C						
NCEP/NCAR	-0,004	2,285	0,324	0,569	0,753	0,429
ERA-Interim	-0,004	1,603	0,560	0,748	0,852	0,638
MERRA	-0,001	1,200	0,791	0,889	0,906	0,806

Tabela 3E - Primavera

	MBE	RMSE	r ²	r	d	C
Amundsen Scott						
NCEP/NCAR	0,0005	1,226	0,379	0,615	0,779	0,479
ERA-Interim	0,003	1,153	0,322	0,568	0,746	0,424
MERRA	-0,005	0,807	0,728	0,853	0,848	0,723
Dome C						
NCEP/NCAR	-0,005	2,195	0,100	0,316	0,541	0,171
ERA-Interim	-0,002	1,051	0,328	0,573	0,759	0,435
MERRA	-0,0005	0,715	0,654	0,808	0,898	0,726

CAPÍTULO 2

A INFLUÊNCIA DOS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA TEMPERATURA EM SUPERFÍCIE NA ANTÁRTICA

1. INTRODUÇÃO

O sistema climático terrestre é denominado por vários modos internos de variabilidade que são caracterizados pela diferença dos padrões temporais e espaciais. No caso da região equatorial e considerando escalas de tempo interanuais, as condições climáticas são influenciadas pelas fases do El Niño-Southern Oscillation (ENSO) ou El Niño-Oscilação Sul (FELDSTEIN, 2000). No entanto, no Hemisfério Sul (HS) o padrão dominante de variabilidade climática é o Southern Annular Mode (SAM) ou Modo Anular do Hemisfério Sul, também conhecido como Antarctic Oscillation (AAO) Oscilação Antártica (CARVALHO et al., 2005).

A Oscilação Antártica é o principal modo de variabilidade climática de circulação atmosférica extratropical e é responsável por aproximadamente 35% do total da variabilidade climática no HS, atuando em escalas temporais que variam de intrasazonal a interanual. Essencialmente é uma estrutura anular com anomalias de pressão zonalmente simétricas e com sinais opostos em altas e médias latitudes. A polaridade positiva da AAO está associada com anomalias negativas na temperatura e altura geopotencial sobre o continente

Antártico e anomalias positivas nas latitudes médias. Nesta fase observa-se aumento de temperatura na Península Antártica e Shetland do Sul, intensificação dos ciclones sobre o Oceano Austral e dos ventos de leste em torno de 60°S. Situações onde os meses correspondem a baixos índices de polaridade são marcadas por anomalias nos sentido oposto (JUSTINO; PELTIER, 2008; MARSHALL, 2007; THOMPSON; SOLOMON, 2002; THOMPSON; WALLACE, 2000).

Trabalhos têm mostrado teleconexões existentes entre as condições atmosféricas no Pacífico tropical e latitudes extratropicais do HS. Hoskins e Karoly (1981) mostraram que regiões de convecção profunda próxima a região equatorial podem gerar ondas de Rossby, através da vorticidade gerada por aquecimento adiabático. Estas ondas movem-se em direção aos pólos em ambos os hemisférios e induzem teleconexão entre ENOS e o clima de médias e altas latitudes. Alguns autores estudaram diferentes variáveis para demonstrar a influência do ENOS em altas latitudes, Mo e White (1985) analisaram as anomalias mensais da pressão em nível do mar e altura geopotencial em 500 hPa. Carvalho et al. (2005) observaram os padrões de teleconexões nas anomalias do vento zonal em 200 hPa. É consenso a grande influência do fenômeno equatorial em altas latitudes. Yuan (2004) mostrou os efeitos do ENOS sobre o gelo marinho Antártico.

Em eventos de El Niño, a alta temperatura da superfície do Oceano Pacífico tropical aumenta a convecção na região equatorial e o gradiente térmico meridional entre o equador e o Pólo. Esse mecanismo fortalece e limita latitudinalmente a célula de Hadley (RIND et al., 2001). Como consequência, o jato subtropical que passa próximo à Austrália também é fortalecido e a região de tempestades é deslocada na direção equatorial na região do Pacífico. Esse deslocamento ocasiona mudança na circulação zonal para leste, fazendo com que o ramo descendente da célula se estabeleça no Oceano Atlântico tropical. Assim, a região de tempestades desloca-se em direção ao Pólo no Atlântico Sul. Logo, mais calor é transportado para a região do Pacífico Sul nos níveis mais baixos da atmosfera. Essa variação no transporte de calor para o Pólo contribui diretamente para a formação de anomalias de temperatura nos oceanos Pacíficos e Atlântico sul (LIU et al., 2002).

Além disso, segundo Yuan (2004), o jato frontal polar que é resultante da subdivisão do jato subtropical, é enfraquecido, o que leva a menor atividade de ciclones na região do Pacífico sudeste, reforçando as anomalias de alta pressão persistentes nessa área. Os ciclones frequentes na bacia do Atlântico também favorecem o centro de alta pressão em Bellingshausen. Marshall e King (1998) destacam que a circulação atmosférica anômala na região dos mares de Amundsen/Bellingshausen, associada a maior advecção de ar quente para essa região, gera invernos mais quentes no oeste da Península Antártica.

O objetivo deste capítulo é analisar a influência que os modos de variabilidade climática exercem sobre a variação da temperatura em superfície na Antártica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados

Os dados de temperatura do ar em superfície do continente Antártico utilizados neste estudo foram obtidos através do Projeto READER – Reference Antarctic Data for Environmental Research (TURNER et al., 2004) para o período de 1989 a 2009. As estações estão localizadas conforme a Tabela 1 e foram obtidos por meio do site <http://www.antarctic.ac.uk/met/READER/data.html>, acessados em abril de 2011.

Tabela 1 - Estações utilizadas no estudo, com a sua posição, elevação e os países as quais pertencem

	Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevação (m)	País
1	Bellingshausen	-62.2	-58.9	15	RUS
2	Ferraz	-62.1	-58.4	20	BRA
3	Rothera	-67.5	-68.1	32	UK
4	Halley	-75.5	-26.7	30	UK
5	Neumayer	-70.7	-8.4	50	ALE
6	Novolazarevskaya	-70.8	11.8	119	RUS
7	Mawson	-67.6	62.9	16	AUS
8	Davis	-68.6	78.0	13	AUS
9	Mirny	-66.6	93.0	40	RUS
10	Casey	-66.3	110.5	42	AUS
11	McMurdo	-77.9	166.7	24	USA
12	Marble Point	-77.4	163.7	108	USA
13	Ferrell	-77.9	170.8	46	USA
14	Gill	-79.9	-178.6	54	USA
15	Dome C	-75.1	123.4	3.280	USA
16	Amundsen Scott	-90.0	0.0	2.835	USA

O modo de variabilidade AAO foi utilizado seguindo o critério de Marshall (2003)¹, compreendendo o mesmo período dos dados de temperatura. A primeira definição deste índice numericamente foi proposta por Gong e Wang (1999) da seguinte forma:

$$AAO = P_{40^{\circ}S}^* - P_{65^{\circ}S}^* \quad (1)$$

em que $P_{40^{\circ}S}^*$ e $P_{65^{\circ}S}^*$ são pressão em nível médio do mar (MSLP) mensais e normalizadas nas latitudes de 40°S e 65°S respectivamente, essas duas latitudes foram escolhidas pelos autores por apresentarem bom coeficiente de correlação e serem estatisticamente significativas entre elas. Mas Marshall (2003) fez pequenas modificações, ao invés de utilizar as duas latitudes citadas, optou por trabalhar com dados de MSLP de seis estações localizadas próximas das latitudes trabalhadas por Gong e Wang (1999) para fornecer a

¹ Disponível em: <http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/sam.html>. Acesso em: out. 2011.

média zonal. Portanto, utilizando a equação (1) foi possível calcular AAO a partir de observações onde posteriormente pode-se comparar com reanálises.

Os dados de ENOS foram obtidos por meio do NOAA no Earth System Research Laboratory na Physical Sciences Division². São dados mensais que compreendem o mesmo período analisado para a temperatura em superfície. Assim como no caso da AAO e a da temperatura observada, foram realizadas médias sazonais para melhor entender os processos atmosféricos da região.

2.2. Métodos de análise

Os dados de temperatura do ar em superfície e os dados dos índices AAO e ENOS foram trabalhados de forma semelhante. Os dados de temperatura que no início eram horários ou em horário sinótico (dependendo da estação), passaram a ser mensais após a realização de média diária. Calculado a média mensal, foi procedida a média sazonal, dividindo em quatro períodos: verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio), inverno (junho, julho e agosto) e primavera (setembro, outubro e novembro). Os dados são divididos por períodos da mesma forma que foi procedido para a temperatura. Com estes dados disponíveis foi calculada a correlação simples entre dados de temperatura, AAO e ENOS, e também foi utilizado o teste estatístico de Student (t) para analisar a influência dos índices AAO e ENOS nas temperaturas de cada estação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que os modos anulares permanecem ativos em determinadas épocas do ano, Gong e Wang (1999) mostraram que a AAO permanece durante todo o ano na troposfera, mas se amplifica com a altura em direção à estratosfera em certos períodos. Thompson e Wallace (2000) mostram também que a estação ativa no HS é no final da primavera e que a AAO parece modular a intensidade da circulação média na baixa estratosfera e a altura da tropopausa sobre latitudes médias e altas.

² Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>>. Acesso em: set. 2011.

Tabela 2 - Correlação entre AAO e ENSO com a temperatura das estações localizadas no continente Antártico, para o período entre 1989-2009

Estações	DJF		MAM		JJA		SON	
	AAO	ENSO	AAO	ENSO	AAO	ENSO	AAO	ENSO
Bellingshausen	0,29	0,13	0,65**	-0,30	0,68**	-0,25	0,56**	-0,44*
Ferraz	0,27	-0,09	0,71**	-0,28	0,70**	0,02	0,57*	-0,38
Rothera	-0,17	-0,24	0,58**	-0,37	0,46*	-0,50*	0,53*	-0,50*
Halley	-0,40	0,21	0,22	-0,27	-0,24	-0,32	0,25	0,07
Neumayer	-0,49	0,34	-0,54*	0,01	-0,11	0,16	-0,10	0,21
Novolazarevskaya	-0,57**	0,46*	-0,59**	0,36	-0,53*	0,03	-0,43*	-0,12
Davis	-0,76**	0,45*	-0,49*	-0,26	-0,48*	-0,19	-0,62**	0,02
Mawson	-0,80**	0,34	-0,59**	-0,12	-0,54*	-0,21	-0,57**	-0,06
Mirny	-0,69**	0,49*	-0,57**	-0,18	-0,60**	-0,07	-0,72**	0,06
Casey	-0,55*	0,32	-0,47*	0,05	-0,57**	-0,06	-0,56*	-0,18
McMurdo	-0,08	0,26	-0,51*	0,15	-0,19	0,11	0,20	0,19
Marble Point	-0,09	-0,07	-0,37	-0,10	-0,07	0,19	-0,09	0,39
Ferrell	-0,19	-0,15	-0,32	-0,34	-0,03	-0,38	-0,33	0,40
Gill	-0,35	0,38	-0,43	0,13	-0,14	-0,09	-0,45	0,43
Dome C	-0,51	0,19	-0,42	-0,16	-0,57**	0,09	-0,20	-0,12
Amundsen Scott	-0,43	0,20	-0,26	0,03	-0,63**	-0,28	-0,18	0,16

Teste de Student (t) = **X** estatisticamente significativo a 10%; **X*** significativo a 5%; **X**** significativo a 1%.

A AAO apresenta maiores correlações com a temperatura em superfície de algumas estações localizadas no continente Antártico, essa correlação poderá variar também a cada estação do ano. Por meio da Tabela 2, verifica-se a correlação existente entre o índice AAO e o ENOS com a variação da temperatura sazonal nas estações.

Segundo Thompson et al. (2000), a tendência da AAO nas últimas décadas para a fase positiva da oscilação está relacionada ao aumento dos ventos de leste em latitudes médias e às condições frias sobre a maior parte da Antártica, exceto sobre a Península, onde existe aquecimento devido a advecção de ar quente das regiões oceânicas. Esse aumento dos ventos de leste são resultados de tendência positiva significativa da AAO durante o outono e verão ao longo das últimas décadas. Esta tendência positiva tem contribuído para a variabilidade espacial da temperatura na Antártica, especificamente aquecimento na região norte da Península (Shetland do Sul) e resfriamento sobre grande parte do continente (THOMPSON et al., 2000; MARSHALL, 2003; THOMPSON; SOLOMON, 2002). Para auxiliar no entendimento das análises, foi dividido conforme o período sazonal.

3.1. Verão

O verão austral é caracterizado principalmente pelas fortes correlações existentes entre a temperatura das estações da Antártica Oriental e a AAO, principalmente as estações na região costeira do Oceano Pacífico, assim como Marshall (2007) também obteve resultado semelhante, onde apenas a estação de Casey é significativa em nível de 5%, as outras estações são significantes a 1%. Além do alto grau de significância é durante o verão que as estações de Davis, Mawson e Mirny apresentam as mais altas correlações negativas, com -0,76, -0,80 e -0,69 respectivamente. Yu et al. (2011) também encontraram resultados semelhantes com tendência forte de resfriamento para as estações de Mawson, Mirny, Casey e Amundsen Scott.

É importante ressaltar que apenas as estações mais significativas por setor serão representadas nos gráficos. O mesmo raciocínio será utilizado nos outros períodos (outono, inverno e primavera).

Conforme está indicado na Figura 1, os gráficos A, B e C representam boa concordância e sentidos opostos entre temperatura e AAO, ou seja, AAO com índice positivo coincide com tendência negativa da temperatura. O período de verão austral é o único período em que Halley apresentou correlação significativa (10% de significância), é o maior valor de correlação para a estação (-0,40). As outras estações da região do Mar de Weddell e Oceano Índico apresentaram correlações negativas com bom índice de significância, Neumayer significativa a 10% e Novolazarevskaya significativa em nível de 1% (gráfico B da Figura 1), a temperatura das três estações desta região estão correlacionadas negativamente com a AAO.

No setor continental, as estações são correlacionadas somente em nível de 10%. Na região do Mar de Ross, Península Antártica e Shetland do Sul (gráficos D e E da Figura 1, respectivamente) as correlações foram fracas, e não significantes. O resultado encontrado para a região da Península Antártica e Shetland do Sul no verão austral não era esperado pelo fato da maioria da literatura encontrar substanciais anomalias de temperatura para a região (MARSHALL, 2007) a partir de regressões com o primeiro componente principal da AAO.

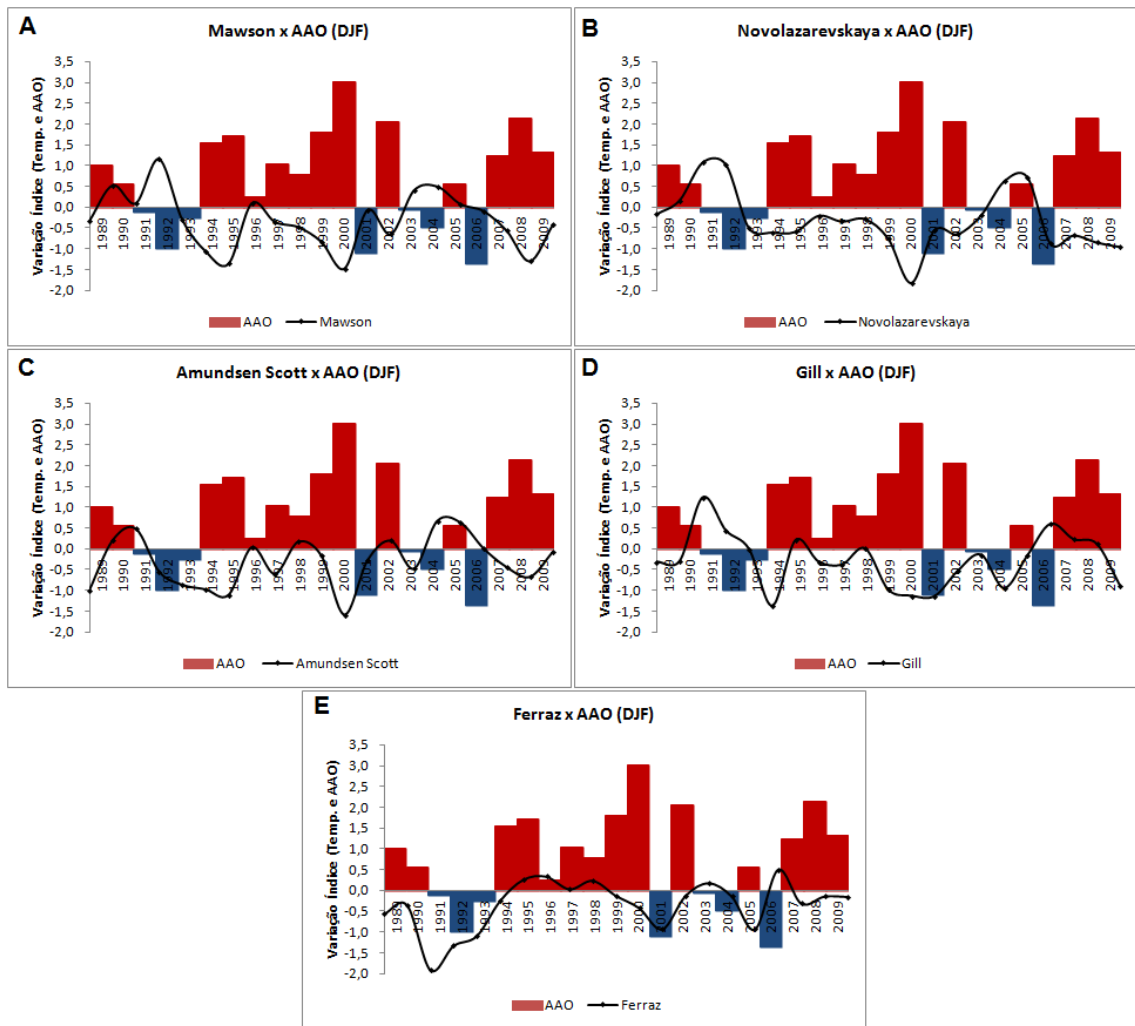


Figura 1 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de verão (DJF), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação da AAO, entre 1989-2009.

As avaliações entre a temperatura e os eventos ENOS mostram que as estações de Novolazarevskaya (gráfico A da Figura 2), Davis e Mirny (gráfico B da Figura 2), localizadas na região entre os oceanos Índico e Pacífico, apresentaram correlação positiva significativa a 5%. No Mar de Ross, a estação Gill foi significativa a 10% (gráfico C da Figura 2). Observa-se na Figura 2 que na última década os eventos de El Niño (La Niña) tiveram menor (maior) ocorrência. De acordo com Carvalho et al. (2005) a convecção profunda no Pacífico central equatorial, o qual está relacionada com a La Niña

(El Niño) modula a circulação no HS e favorece a fase positiva (negativa) da AAO durante o verão austral.

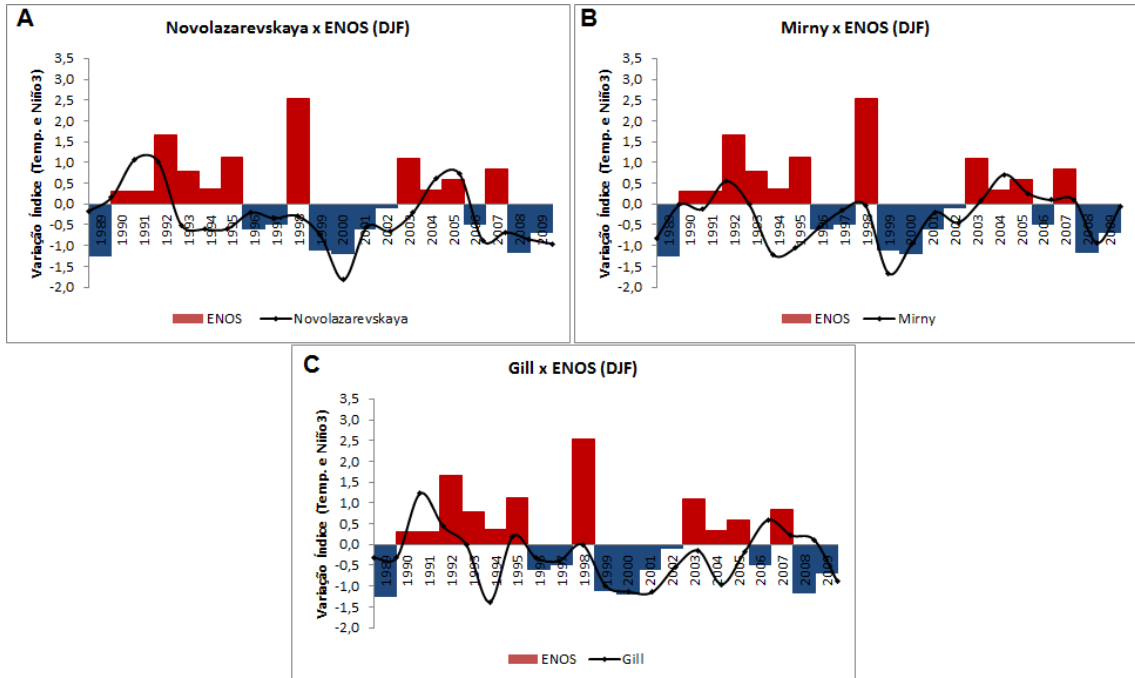


Figura 2 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de verão (DJF), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação do ENOS, entre 1989-2009.

3.2. Outono

Durante o outono austral, apenas uma estação apresentou correlação negativa significativa a 10% com o ENOS, a estação Rothera localizada na Península Antártica. Durante os 20 anos da série em estudo, a ocorrência de El Niño foi maior que os eventos de La Niña, porém na última década a intensidade do El Niño foi menor o que poderia influenciar em tendência menor de aquecimento da região, no entanto, a ocorrência da fase positiva da AAO (como pode ser observado na Figura 3) contribui para a tendência de aquecimento na região.

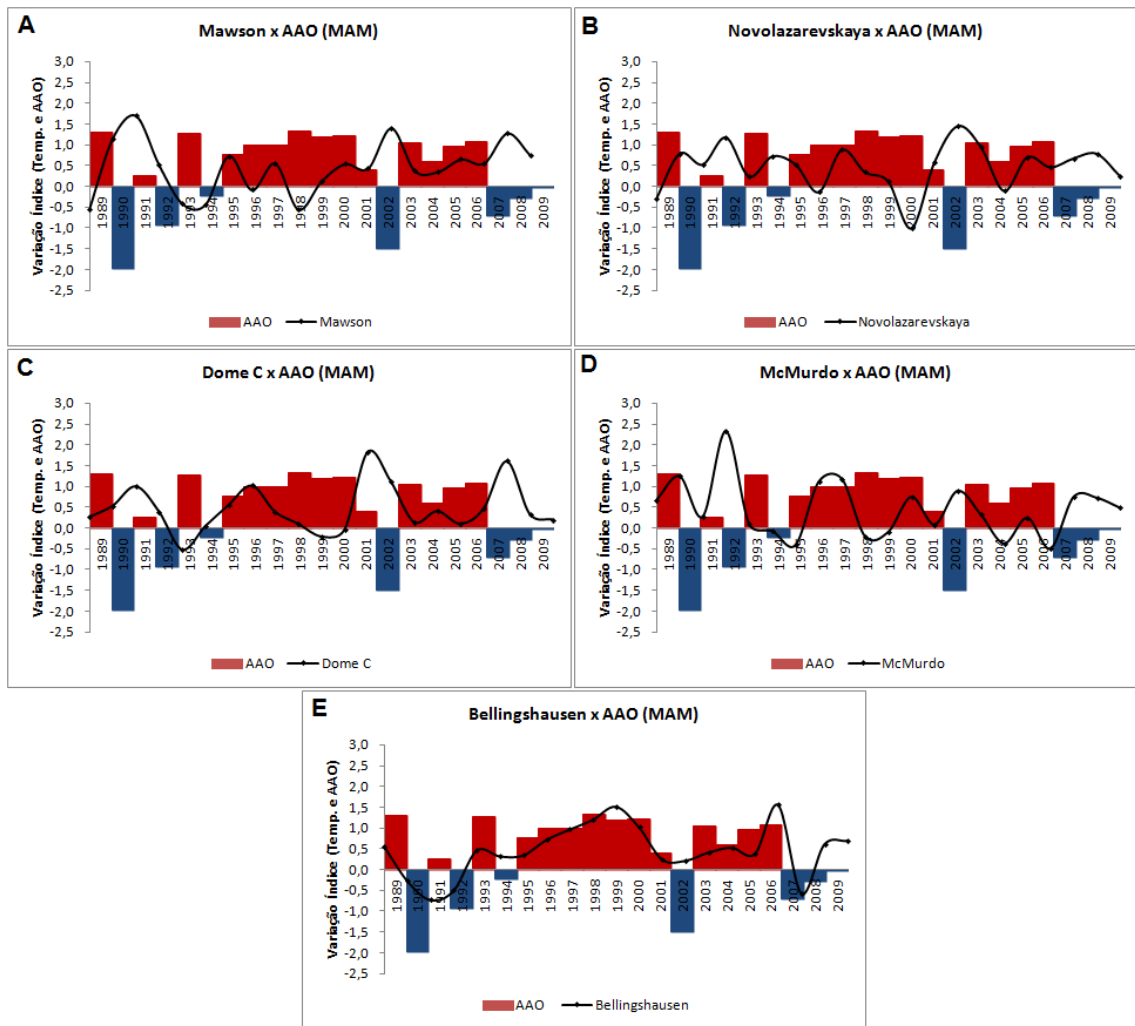


Figura 3 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de outono (MAM), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação da AAO, entre 1989-2009.

As correlações da AAO com as temperaturas são positivas significativamente em nível de 1% para as três estações localizadas na Península Antártica e Shetland do Sul durante o período de outono austral (MAM): para Bellingshausen, o índice de correlação foi 0,65, sendo que o gráfico E da Figura 3 confirma a forte correlação positiva entre o índice AAO e a temperatura da estação. Ferraz obteve o maior índice com 0,71 e Rothera o menor. Esse resultado é semelhante ao encontrado por alguns autores (MARSHALL, 2007; YU et al., 2011; STEIG et al., 2009). Para as estações da

região do Oceano Índico e Mar de Weddell a AAO apresentou diferentes situações, enquanto para a estação de Novolazarevskaya a correlação foi negativa (-0,59) e significativa estatisticamente em nível de 1% (gráfico B da Figura 3), para estação de Neumayer a correlação foi significativa em nível de 5%. Assim como Marshall (2007) encontrou, somente para a estação de Halley a AAO não foi significativa durante o outono. Esta estação ainda apresentou a menor correlação encontrada entre todos os períodos do ano (0,21), e diferentemente das outras duas estações, a correlação foi positiva.

Para as estações localizadas no setor oriental da Antártica, na região costeira do Oceano Pacífico, foram encontradas correlações negativas entre AAO e temperatura. Similar resultado foi encontrado por Thompson e Solomon (2002) e Yu et al. (2011). As estações Mawson (gráfico A da Figura 3) e Mirny foram significativas em nível de 1% e com índices de correlações de -0,59 e -0,57 respectivamente. As estações localizadas mais ao extremo da região, Davis e Casey apresentam correlações significativas em nível de 5%. A estação Davis juntamente com Novolazarevskaya apresentou o maior índice de correlação negativa entre todas as estações da Antártica para o período de outono austral.

A região do Mar de Ross e o setor continental da Antártica foram as regiões que apresentaram o menor índice de significância entre AAO e a temperatura em superfície, para a primeira região citada, apenas a estação de McMurdo foi significativa em nível de 5% (gráfico D da Figura 3). As estações Gill e Marble Point foram significativas a 10%, assim como Dome C na região continental (gráfico C da Figura 3). As estações Ferrell e Amundsen Scott não apresentaram correlações significativas durante o outono. Embora mostre valores negativos.

3.3. Inverno

O padrão espacial de correlações entre AAO e temperatura apresentada no inverno é semelhante ao outono, em geral as correlações são menores no inverno, e em alguns casos significa redução da significância das correlações. Das 16 estações em análise, apenas cinco estações apresentaram aumento no índice da correlação ou na sua significância

estatística. As estações de Bellingshausen (gráfico E da Figura 4) na região das Shetland do Sul e Mirny (gráfico A da Figura 4) na Antártica Oriental foram as estações que aumentaram o seu índice de correlação, e continuaram estatisticamente significantes em nível de 1% .

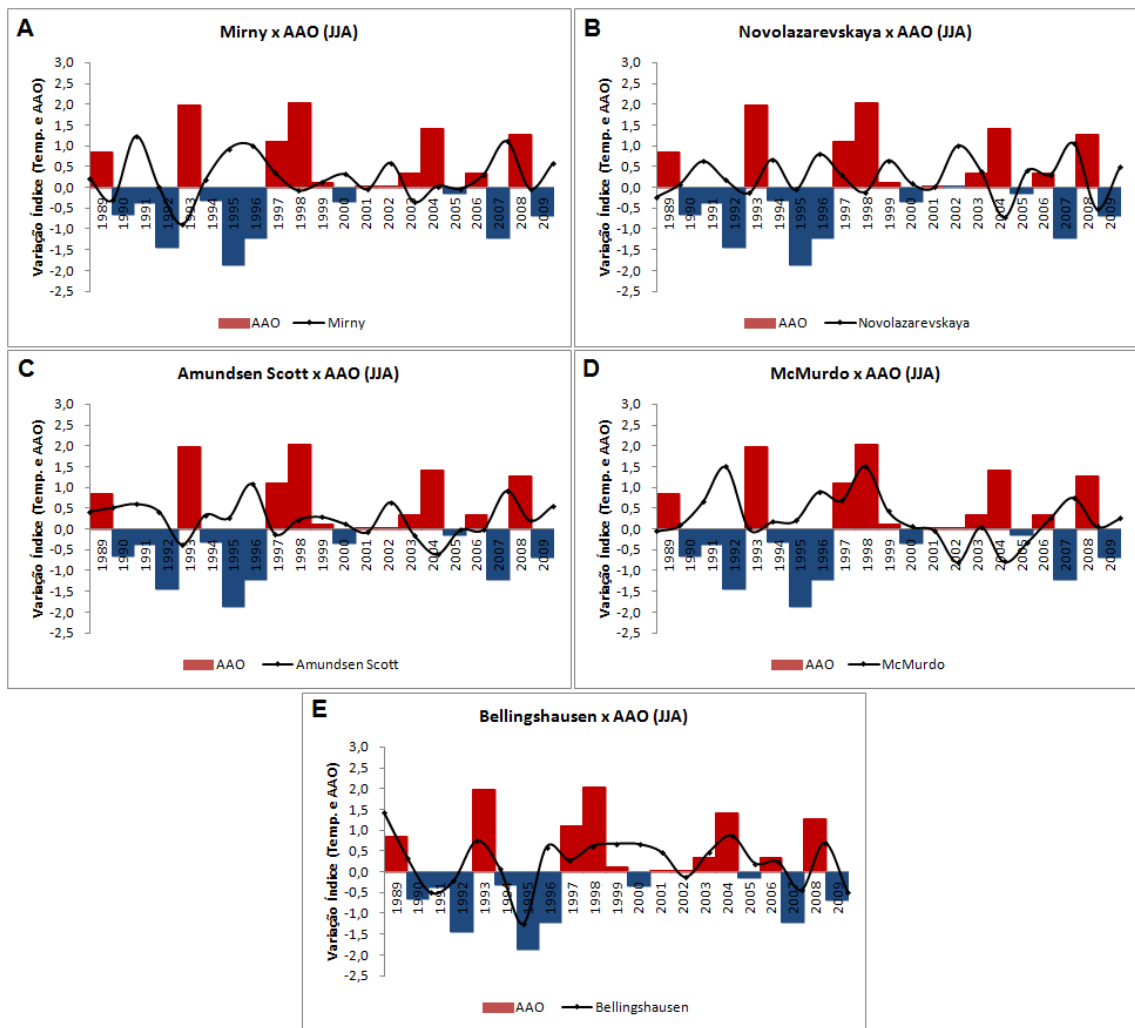


Figura 4 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de inverno (JJA), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação da AAO, entre 1989-2009.

Também localizada na região da Antártica Oriental, Casey além de aumentar o seu índice de correlação entre a AAO e temperatura, aumentou a sua significância, passando de 5% (encontrado no outono) para 1% durante o inverno. Mas a região que merece maior destaque é o setor continental, porque além de apresentarem os seus maiores índices de correlações para o período, as duas estações foram significativas estatisticamente em nível de 1%, Amundsen Scott com correlação negativa de -0,63 (gráfico C da Figura 4) e Dome C com -0,57.

Para as demais estações os valores de correlação ou a significância estatística foram menores se comparados aos valores encontrados durante o outono: Ferraz, Davis e Ferrell apenas diminuíram o índice da correlação, as estações de Rothera, Neumayer, Novolazarevskaya (gráfico B da Figura 4), Mawson, McMurdo (gráfico D da Figura 4), Gill e Marble Point além de diminuir o índice da correlação, a significância estatística também foi menor. Para a região da Antártica Oriental, Marshall (2007) também encontrou valores de correlação geralmente menores para o inverno.

Assim como durante o outono, a única estação que obteve correlação significativa estatisticamente (em nível de 5%) com o ENOS foi Rothera, com correlação negativa de -0.50. Karoly (1989) observou que um trem de ondas é observado durante o inverno austral em anos de El Niño, este trem de ondas afeta as condições sinóticas sobre a região sul da América do Sul e a Península Antártica. E como as ocorrências de El Niño são muito maiores e de maior ocorrência que eventos de La Niña (não apresentado) durante o inverno, associado com pequena tendência positiva da AAO (Figura 4) contribuem para o aquecimento na região de Rothera.

No inverno de modo geral, a menor correlação existente entre AAO e a temperatura em superfície em relação ao outono significa que a influência do modo de variabilidade é menor na variação da temperatura (MARSHALL, 2007). A única estação que apresentou resultado atípico das demais foi Halley, durante o outono obteve correlação positiva fraca, passou para correlação negativa também fraca, esse resultado é contrário aos resultados encontrados das demais estações e dos estudos realizados por Marshall (2007). As razões que levam esta estação a resultados não estão bem esclarecidos. De acordo com Turner et al., (2005) a estação de Halley apresentou diminuição dos

ventos meridionais que circundam a Antártica, reduzindo maior influência da AAO.

3.4. Primavera

Durante a primavera as correlações existentes entre AAO e a temperatura não variam muito, apenas algumas considerações importantes devem ser ressaltadas. É neste período que a correlação entre as temperaturas na Península Antártica e Shetland do Sul (gráfico E da Figura 5) e AAO diminui em relação ao outono e inverno. Para a estação Ferraz a significância diminui do nível de 1% para 5%, assim como para a estação de Novolazarevskaya (gráfico B da Figura 5) na região do Oceano Índico e Casey no Oceano Pacífico.

Para as regiões do setor continental e do Mar de Ross (gráfico D da Figura 5), apenas a estação Gill é significativa a 10% e a estação McMurdo que inverte a sua correlação, passando de negativa para positiva (única correlação positiva da estação para todo o período do ano), essa diminuição no valor da correlação, também foi observado por Marshall (2007) durante o seu estudo para a estação de Vostok, que fica entre Amundsen Scott e Dome C (gráfico C da Figura 5). A região da Antártica Oriental (gráfico A da Figura 5) apenas Casey foi significativa em nível de 5%, as demais estações foram significantes estatisticamente em nível de 1%, o que demonstra a forte correlação existente entre a variação da temperatura em superfície e a AAO nesta região. Thompson e Wallace (2000) demonstraram que a estação ativa da AAO no Hemisfério Sul é no final da primavera austral e que a AAO parece modular a intensidade da circulação média na baixa estratosfera, a altura da coluna de ozônio e a altura da tropopausa sobre latitudes médias e altas.

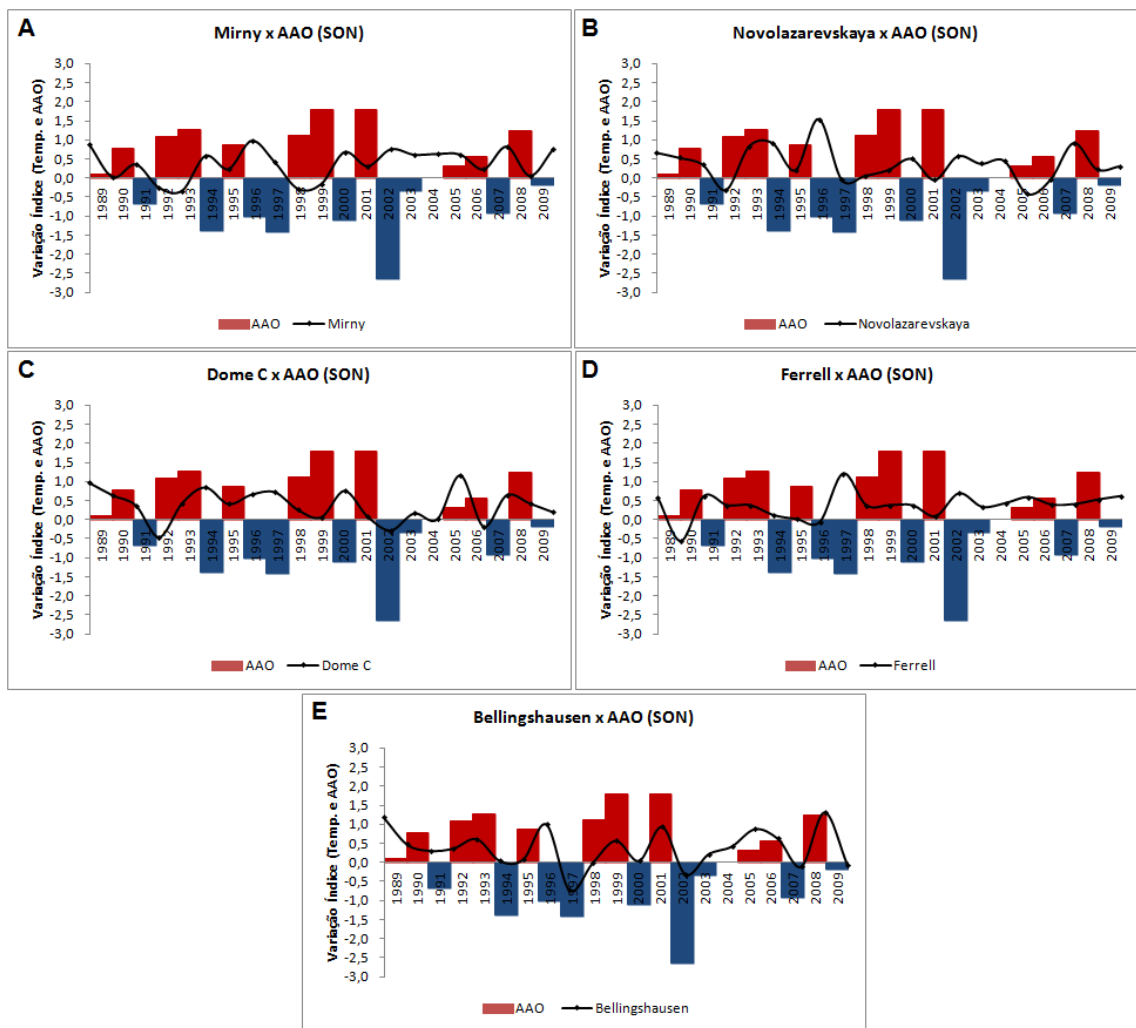


Figura 1 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de primavera (SON), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação da AAO, entre 1989-2009.

As estações da Península Antártica e Shetland do Sul apresentaram boa correlação com o ENOS, Bellingshausen e Rothera (gráficos A e B da Figura 6) foram significativas estatisticamente a 5%, enquanto Ferraz a 10%. Outra região da Antártica que apresentou correlação entre temperatura em superfície e ENOS foi o Mar de Ross, com as estações Ferrell (gráfico C da Figura 6), Gill e Marble Point com significância de 10%. De acordo com Fogt e Bromwich (2006), durante o período de primavera austral, ocorre aumento nos bloqueios atmosféricos sobre o Pacífico e aumento da pressão atmosférica em

eventos de El Niño. Como pode ser observado na Figura 6, os eventos de El Niño foram em maior número que os eventos de La Niña durante o período de primavera austral. Ainda de acordo com os autores, durante o El Niño os ventos meridionais são intensificados na região da Península transportando calor de latitudes mais baixas. No setor do Mar de Ross, a tendência é de aquecimento, porém o El Niño está associado com tendência de resfriamento na região. Os eventos de El Niño, apesar de serem em maior frequência, diminuíram de intensidade na última década se comparado com a década de 1980. Isto pode ser uma das causas para a tendência de aquecimento na região durante a primavera.

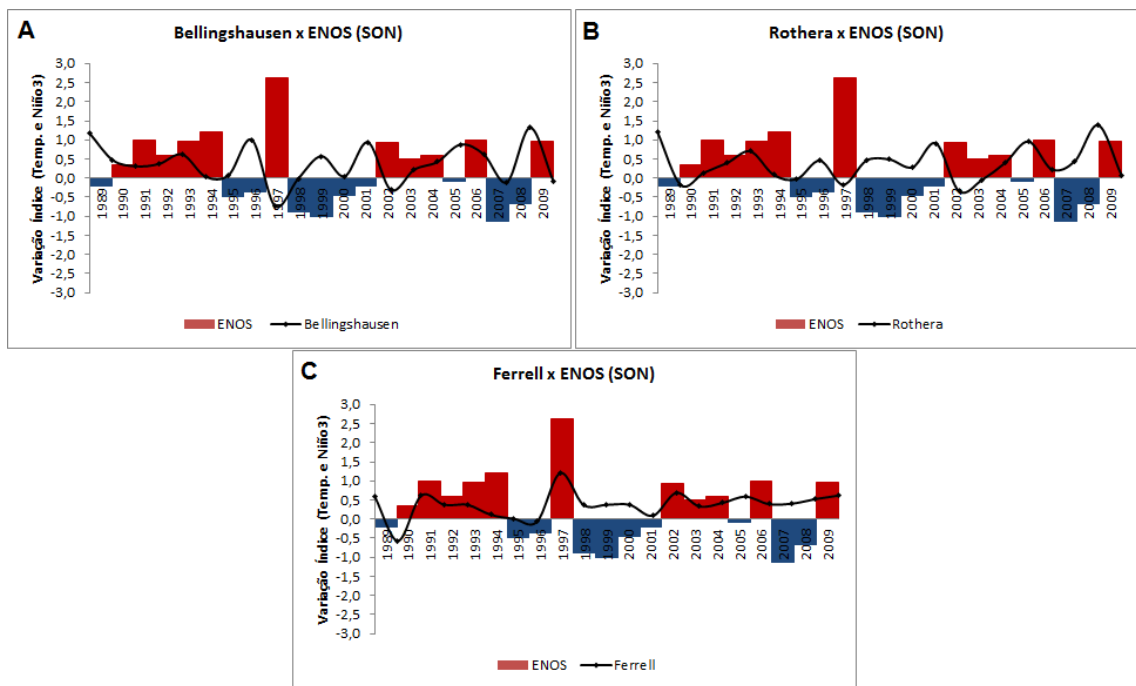


Figura 6 - Gráficos de estações localizadas na Antártica para o período de primavera (SON), a linha escura representa a variação da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em superfície nas estações, as barras representam a variação do ENOS, entre 1989-2009.

4. CONCLUSÕES

O verão austral é caracterizado pela redução da área de cobertura do gelo marinho em torno do continente Antártico, as únicas regiões que possuem área significativa de gelo são o Mar de Ross e o Mar de Weddell, essa última área possui grande influência na formação de fenômenos meteorológicos. A AAO apresentou grande contribuição para a variação da temperatura em superfície, principalmente para as estações dos setores do Mar de Weddell, Oceano Índico e setor oriental da Antártica. Com tendência positiva durante o período analisado, as correlações negativas estatisticamente significantes encontradas nas estações da Antártica Oriental foram às esperadas.

No setor continental apesar da pequena tendência de aquecimento, a AAO apresentou correlações negativas e significantes estatisticamente de acordo com o teste t. No Mar de Ross não foram observadas variações significativas associadas com a AAO. Na região da Península Antártica e Shetland do Sul, a variação da temperatura não demonstrou influencia dos modos de variabilidade, pois nenhum dos dois apresentou tendências significativas com a temperatura em superfície.

Os elevados valores de correlação positiva e os altos índices de significância estatística entre a temperatura em superfície das estações e a AAO era esperado para a região da Península Antártica e Shetland do Sul durante o período de outono austral. Como a tendência é de pequeno aquecimento na região. Rothera foi à única estação que apresentou correlação com o ENOS, significativa em nível de 10%, como o índice positivo do ENOS vem diminuindo com o passar do tempo de análise, pode ser uma das possíveis respostas para a correlação positiva no Oceano Pacífico Oeste, pois a correlação é negativa entre temperatura da estação e ENOS.

O resultado mais surpreendente se deu na costa oriental da Antártica, enquanto estudos que analisaram décadas anteriores sempre indicaram o outono como período de tendência de resfriamento significativo no continente Antártico, o que se observou nos últimos 20 anos é mudança neste padrão, onde quatro estações apresentaram tendências de aquecimento significativas e as demais com tendência de aquecimento também, porém, não significativas (exceção é as estações do Mar de Ross) para este período de estudo. Apesar

de a AAO manter tendência positiva (durante a fase positiva da AAO gera anomalias negativas de pressão e temperatura no continente Antártico), os seus índices são baixos, o que pode estar contribuindo para essa tendência de aquecimento, já que a grande maioria das estações apresentou correlações significativas aos níveis de 5% e 1%, já que o ENOS não possui nenhuma correlação significativa com a temperatura das estações.

A única região que apresentou pequena tendência de resfriamento durante o outono austral foi o Mar de Ross, e somente a AAO foi significativa em nível de 10% para três das quatro estações, o que de certa forma está de acordo com a fase positiva da AAO. ENOS não apresenta valores significativos em relação à temperatura em superfície nesta região.

Durante o inverno austral na Antártica, as variações da temperatura em superfície não foram significativas, ENOS e AAO mantiveram com índice positivo na maioria do período analisado, porém, como no outono, os índices foram menores nesta última década. O padrão positivo da AAO se manteve, com correlações positivas altas na região da Península Antártica e Shetland do Sul, significativas estatisticamente em nível de 1% para as estações das Ilhas Shetland do Sul e a 5% para Rothera, esta última estação também foi significativa a 5% com o ENOS, mas com correlação negativa. Em contrapartida as estações localizadas no continente em sua maioria apresentaram fortes correlações negativas com a AAO e significativas aos níveis de 5% (Novolazarevskaya, Davis e Mawson) e a 1% (Mirny, Casey, Amundsen Scott e Dome C). Apenas as estações do Mar de Ross e Mar de Weddell que não apresentaram correlações significativas com os modos de variabilidade. Os resultados encontrados apenas reforçam a grande influência que a AAO exerce sobre a Antártica durante o período de inverno.

As tendências das temperaturas em superfície na Antártica, de forma geral, são ainda menores durante a primavera quando comparadas às tendências do inverno. Porém, as correlações se mantêm altas e significativas estatisticamente, como por exemplo, a correlação positiva entre as estações da Península e Shetland do Sul com a AAO (aos níveis de 5% e 1% de significância) e as estações do Mar de Ross com o ENOS (significativas a 10%). As correlações negativas das estações da Península e Shetland do Sul

com o ENOS e das estações na costa oriental da Antártica com a AAO, também são significativas aos níveis de 5% e 1%.

Apesar do índice da AAO ser menor na última década, o fenômeno exerce grande influência nas regiões da Península Antártica e Shetland do Sul, além do setor Oriental da Antártica, apesar das pequenas variações das temperaturas. O ENOS que também apresenta pequeno índice positivo na última década contribui significativamente para as estações da Península, Shetland do Sul e Mar de Ross, com significâncias de 5% na maioria dos casos. O ENOS pode ser o principal contribuinte para a pequena tendência de aquecimento na estação Rothera, como mencionado antes, o sinal positivo do ENOS é responsável pela retração do gelo marinho na costa oeste da Península Antártica e também por contribuir significativamente com ventos sul na região do Mar de Ross, o que pode ser comprovado pela forte tendência de resfriamento da estação McMurdo para a primavera austral.

Com a finalidade de complementar o trabalho deve-se investigar:

- As influências dos modos de variabilidade em outras variáveis meteorológicas;
- A importância do gelo marinho como forçante das variáveis meteorológicas e vice-versa;
- Correlação existente entre os modos de variabilidade e o gelo marinho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; AMBRIZZI, T. Opposite phases of the Antarctic Oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer, **Journal of Climate**, v. 18, p. 702-718, 2005.

FELDSTEIN, S.B. Teleconnections and ENSO: the timescale, power spectra, and climate noise properties. **Journal of Climate**, v. 13, p. 4430-4440, 2000.

FOGT, R.L.; BROMWICH, D.H. Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high-latitude south Pacific governed by coupling with the southern annular mode. **Journal of Climate**, v. 19, p. 979-997, 2006.

GONG, D.; WANG, S. Definition of Antarctic oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p. 459-462, 1999.

HOSKINS, B.J.; KAROLY, D.J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 1179-1196, 1981.

JUSTINO, F.B.; PELTIER, R. Climate anomalies induced by the Arctic and Antarctic Oscillations: Glacial Maximum and present-day perspectives. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3 p. 459-475, 2008.

KAROLY, D.J. Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño-Southern oscillation events. **Journal of Climate**, v. 2, p. 1239-1252, 1989.

LIU, J.; YUAN, X.; RIND, D.; MARTINSON, D.G. Mechanism study of the ENSO and southern high latitude climate teleconnections. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 24, p. 1-4, 2002.

MARSHALL, G.J. Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. **Journal of Climate**, v. 16, p. 4134-4143, 2003.

MARSHALL, G.J. Short communication: half-century seasonal relationships between the Southern Annular Mode and Antarctic temperatures. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 373-383, 2007.

MARSHALL, G.J.; KING, J.C. Southern hemisphere circulation anomalies associated with extreme Antarctic Peninsula winter temperatures. **Geophysical Research Letters**, v. 25, p. 2437-2240, 1998.

MO, K.C.; WHITE, G.H. Teleconnections in the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 113, p. 22-37, 1985.

RIND, D.; CHANDLER, M.; LERNER, J. et al. The climate response to basin-specific changes in latitudinal temperature gradients and the implications for sea ice variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. 20, p. 161-173, 2001.

STEIG, E.J.; SCHNEIDER, D.P.; RUTHERFORD, S.D. et al. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. **Nature**, v. 457, p. 459-463, 2009.

THOMPSON, D.W.J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, v. 296, p. 895-899, 2002.

THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J.M. Annular modes in the extratropical circulation: Part I: Month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000-1016, 2000.

THOMPSON, D.W.J.; WALLACE, J.M.; HEGERL, G.C. Annular modes in the extratropical circulation: trends. **Journal of Climate**, v. 13, p. 1018-1036, 2000.

TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J. et al. The SCAR READER project: towards a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2890-2898, 2004.

TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J. et al. Antarctic climate change during the last 50 years. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 279-294, 2005.

YU, L.; ZHANG, Z.; ZHOU, M. et al. Influence of the Antarctic oscillation, the Pacific-South American modes and the El Niño-Southern oscillation on the Antarctic surface temperature and pressure variations. **Antarctic Science**, p. 1-18, 2011.

YUAN, X. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. **Antarctic Science**, v. 16, p. 415-425, 2004.

CONCLUSÃO GERAL

Após a análise por regiões da Antártica, ficou claro que o continente passou por mudanças de temperatura do ar em superfície durante o período de 1989 a 2009. A grande porção do continente apresenta tendência de aquecimento na última década, entre 1999-2009. Todavia a região das Shetland do Sul indica tendência de resfriamento.

A AAO pode ser um dos principais responsáveis pela tendência de resfriamento na região das Shetland do Sul, principalmente durante o outono e o inverno. O lado oeste da Península foi a exceção, a estação Rothera continuou com tendência de aquecimento para todo período. Rothera também apresentou boa correlação com o ENOS durante o outono, inverno e primavera, sendo correlacionada negativamente pelo menos em nível de 10%. Quando comparado ao proposto pelas reanálises, nota-se que no lado oeste da Península, o desempenho das reanálises foi baixo, o ERA-Interim foi a reanálise que obteve as melhores correlações com os dados observados na estação Rothera, enquanto o MERRA para as outras duas estações da região.

Por influência do Mar de Weddell, a estação de Halley apresentou tendências pouco diferentes em relação às outras duas estações do setor do Mar de Weddell. Com tendência significativa de resfriamento na primeira parte da série, passou para forte tendência de aquecimento na segunda parte. O verão foi marcado por apresentar tendência significativa de aquecimento, o que contribuiu muito para o resultado final de aquecimento nesta segunda parte do

período em análise. As estações de Neumayer e Novolazarevskaya que estão localizadas na região costeira do oceano Índico, apresentaram tendências diferentes entre si na primeira década, enquanto Neumayer indicou tendência de aquecimento para todo o período. Novolazarevskaya apresentou mudança de resfriamento para aquecimento. A última estação citada obteve tendência significativa de resfriamento no verão e correlação significativa com a AAO em todos os períodos, enquanto Neumayer apenas no verão e outono.

As reanálises que se destacaram na região apresentando bons resultados quando comparados às observações foi o MERRA e o NCEP-NCAR, a primeira se destacando para o período outono-inverno e a segunda para o período primavera-verão.

O setor do oceano Pacífico talvez seja a região que apresenta resultados distintos se comparado aos estudos realizados em períodos anteriores. Mirny indicou tendência de aquecimento significativo para todo o período, enquanto as demais estações a tendência não foi significativa. Vale ressaltar que essa tendência de aquecimento ocorreu na segunda metade do período avaliado. Na década de 90 a tendência de resfriamento prevaleceu para toda a região. O principal período de mudança na tendência foi o outono, enquanto autores encontraram tendências de resfriamento, neste estudo a tendência foi de aquecimento significativo para quase todas as estações, menos para Casey, onde ocorreu aquecimento, mas não significativo. Todas as estações apresentaram alta correlação com a AAO, para todos os períodos analisados, a correlação mínima foi de 5%, o que indica a grande influência deste modo de variabilidade climática durante o outono, uma vez que os valores positivos do índice vêm diminuindo na última década. O ENSO não apresentou grande influência na região. A reanálise que obteve melhores resultados foi o MERRA para as estações da região costeira do oceano Pacífico na Antártica.

Para o setor do Mar de Ross, a tendência da temperatura do ar próximo à superfície foi significativa unicamente na estação McMurdo durante a primavera com tendência de resfriamento. O setor de Ross é uma região atípica, não acompanha a tendência do restante do continente que é de aquecimento, no Mar de Ross a tendência é de resfriamento para o período analisado inclusive durante o outono que o aquecimento é tão significativo nas

outras regiões do continente. As reanálises na região do Mar de Ross as não obtiveram bom desempenho. Os modos de variabilidade nesta região da Antártica exercem pouca influência, apenas no outono é encontrado algumas correlações significativas entre os dados observados nas estações e a AAO e com o ENSO durante a primavera.

A região central apresentou tendência de aquecimento durante o período analisado. Os resultados mostram tendência de resfriamento na primeira década, mudando posteriormente. O maior aquecimento ocorreu durante o outono, onde até então era caracterizado por tendência de resfriamento em décadas anteriores, principalmente na estação Amundsen Scott. Apesar desta forte tendência de aquecimento, é durante o inverno os maiores índices de correlações negativas entre dados de temperatura e AAO nesta região (significativo a 1%). Durante o verão também foi significativo, mas em nível de 10% com a AAO para as duas estações. Em se tratando de reanálises, o MERRA apresentou resultados muito superiores em relação às outras reanálises, nesta região do continente Antártico.

Em suma, a Antártica de forma geral apresenta processo de mudança no padrão da temperatura em superfície, passando de tendência de resfriamento para aquecimento, a exceção ficou por parte da região norte da Península Antártica, nas Ilhas Shetland do Sul, onde estão localizadas as estações Bellingshausen e Ferraz e o Mar de Ross. A AAO apresentou grande influência nesta variação, principalmente no outono, onde o seu índice positivo diminuiu nesta última década. A comparação entre as observações e os dados de reanálises mostra que o MERRA apresenta melhor resultado para todas as estações de forma geral, principalmente para a região central do continente. O ERA-Interim apresentou dificuldades em alguns setores. O NCEP-NCAR apresentou rendimento inferior na parte central do continente, nas demais regiões apresentou bom rendimento.