

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Programa de Pós-graduação em Meteorologia

CRISTINA PAMELA DAVILA ARRIAGA

**Estudo dos eventos de geadas na serra peruana em simulações  
climáticas regionais**

São Paulo  
2016

**CRISTINA PAMELA DAVILA ARRIAGA**

**Estudo dos eventos de geadas na serra peruana em simulações climáticas regionais**

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rosmeri Porfírio da Rocha

**Versão corrigida. A original encontra-se disponível na Unidade**

São Paulo

2016

Dedico este trabalho aos meus pais e minha irmã, porque apesar da distância sempre senti seu amor, apoio e conselhos para culminar esta etapa na minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Nas seguintes linhas desejo agradecer a todas as pessoas que me ajudaram na conclusão deste trabalho:

A minha orientadora Rosmeri Porfirio da Rocha pela confiança em minha pessoa, disponibilidade e paciência nas reuniões e discussões dos resultados, assim como o profissionalismo na orientação da pesquisa.

Ao Programa de Meteorologia da Pós-Graduação do IAG e a CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

À minha família pelo apoio moral para culminar esta etapa da minha formação.

Aos amigos da minha turma de mestrado, em especial a Odete Amelia Mácie, Bionídio Enoque Banze e Kátia Mendes de Barros, pela ajuda no entendimento dos termos meteorológicos nas tarefas das disciplinas do curso e pelos momentos de alegria compartilhados.

Da mesma forma, agradecer à turma de “Domingos de chaufa” (Eleazar Chuchón Ângulo, Diana Marcela Guerrero Ortiz e Edgar Monastoque Parrado) por tornar meus domingos mais alegres para voltar ao trabalho do mestrado nas segundas com mais entusiasmo.

A meus amigos Juan Bazo, pelo apoio e disposição a distancia, Mario Gavidia pela ajuda nos primeiros dias da minha estadia no Brasil e procedimentos no curso, e Alexandre Tique pelos momentos de intercambio de conhecimento na disciplina cursada.

“A possibilidade de realizarmos um sonho é o que torna a vida interessante”.

Paulo Coelho

## RESUMO

DAVILA, A. C. P. **Estudo dos eventos de geadas na serra peruana em simulações climáticas regionais**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

As geadas são eventos meteorológicos que apresentam maior intensidade e frequência na região dos Andes pela influência da elevada topografia e são identificadas com temperaturas mínimas diárias iguais ou menores que 0°C. Nos últimos anos, os modelos climáticos regionais (MCR) têm sido usados na análise, validação e projeções futuras do clima devido à maior resolução espacial da grade com que podem ser executados. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a tendência futura da ocorrência das geadas nos Andes peruanos usando diferentes simulações climáticas do MCR RegCM4.3. Além disto, foram analisados os padrões sinóticos durante a ocorrência de geadas através análise de composições. As simulações do RegCM4.3 foram aninhados na reanálise ERA-Interim (RegERAInterim) e nos modelos globais HadGEM2-ES (RegHadGEM), GFDL-ESM2M (RegGFDL) e MPI-ESM-MR (RegMIP) no clima presente (1971-2005) e futuro (2060-2090) no cenário RCP8.5. Utilizou-se a técnica estatística *perfect prog* para ajustar a temperatura mínima observada e simulada no clima presente. Três zonas (zona norte – ZN, zona centro – ZC e zona sul – ZS) foram consideradas para identificar as geadas. No clima presente, todas as simulações apresentam *bias* quente comparado com os dados observados nas três zonas de análise, enquanto que a análise do *Climate Research Union* (CRU) mostra *bias* frio. Encontrou-se que o *perfect prog* melhora a representação do ciclo anual simulado especialmente na ZC e ZS, diminuindo o *bias* quente. As tendências históricas entre 1971 – 2005 indicam aumento de frequência de geadas na ZN, diminuição de geadas no verão e outono da ZC e ausência de tendência na ZS. O ciclo anual da frequência de geadas na ZC e ZS apresentam valores máximos no inverno e mínimos no verão, enquanto que a ZN mostra dois valores máximos de geadas: em julho e novembro. A frequência de geadas aumenta desde a ZN com máximos de 4%, ZC com 60% e ZS com 80% no inverno. Segundo as anomalias de composições, as geadas no inverno ocorrem pelo resfriamento radiativo nas noites de céus abertos, pouca umidade na atmosfera, subsidência do ar e enfraquecimento dos ventos de oeste em 500 hPa. A maioria das simulações reproduzem a maior parte destes padrões durante a ocorrência de geadas, exceto na circulação em 500 hPa. Todas as projeções futuras indicaram uma diminuição na ocorrência de geadas ao longo do ano para as três zonas de análise.

**Palavras-chave:** Geadas, temperatura mínima diária, região Andina, RegCM4.3, *perfect prog*, análise de composições.

## ABSTRACT

DAVILA, A. C. P. **Study of frost events in the Peruvian highlands in regional climate simulations.** 2016. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Frosts are meteorological events that have greater intensity and frequency in the Andean region due the elevated topography and are identified using daily minimum temperatures equal or less to 0° C. In recent years, regional climate models (RCM) have been used in the analysis, validation and future climate projections due to higher spatial resolution that can be executed. The main objective of this work was to evaluate the future trend of the occurrence of frosts over Peruvian Andes using different climate simulations of RCM RegCM4.3. Furthermore, the main synoptic patterns during the occurrence of frosts were described using composites analysis. RegCM4.3 simulations were nested in ERA-Interim reanalysis (RegERAInterim) and global models HadGEM2-ES (RegHadGEM), GFDL-ESM2M (RegGFDL) and the MPI-ESM-MR (RegMIP) for the present (1971–2005) and future (2060-2090) climates with RCP8.5 scenario. The *perfect prog* statistical technique was used to adjust the simulated and observed minimum temperature in the present climate. Three zones (north zone - ZN, center zone - ZC and south - ZS) were used to identify frosts. For present climate, all simulations present a warm bias compared with the observed data in the three analysis zones, while the CRU analysis has a cold bias. It was found that the *perfect prog* improves the representation by the simulations of the annual cycle of minimum temperature mainly in ZC and ZS, decreasing the warm bias. For the years 1971 – 2005, the observed historical trends show an increase of frost in ZN, a decrease of frost in summer and autumn in ZC and no frost trends in ZS. The annual cycle of frost frequencies in ZC and ZS have maximum values in winter and minimum in summer, while ZN has two maximums in frost: July and November. Frosts frequency increase since ZN with maximum values of 4%, 60% in ZC and 80% in ZS in winter. All RegCM4.3 future projections indicated a decrease in the occurrence of frosts throughout the year for the three analysis zones. According to the composites anomalies, in winter frosts occur associated with radiative cooling in the evenings open skies, low humidity in the atmosphere, air subsidence and weakening of the westerlies at 500 hPa. Most of simulations reproduce these patterns during frosts, except that observed in 500 hPa circulation. Future projections indicate a decrease of occurrence of frosts during the year in the three zone of analysis.

**Keywords: Frost, daily minimum temperature, Andean region, RegCM4.3, *perfect prog*, composites analysis.**

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	1
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
1.2.1. O CLIMA DO PERU E IMPORTÂNCIA DOS ANDES .....	2
1.2.2. CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA NA CORDILHEIRA ANDINA.....	5
1.2.3. TENDÊNCIAS PASSADAS E FUTURAS DE GEADAS NO GLOBO.....	6
1.2.4. MODELAGEM CLIMÁTICA REGIONAL NA AMÉRICA DO SUL .....	9
<b>2 DADOS E METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
2.1 O MODELO CLIMÁTICO REGCM4 .....	15
2.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS .....	16
2.2.1. Dados de estações meteorológicas .....	16
2.2.2. Dados das simulações do modelo RegCM4.....	17
2.2.3. Dados do CRU .....	20
2.2.4. Dados de reanálise .....	20
2.3 TRATAMENTO DOS DADOS .....	21
2.3.1. Diagrama de Taylor .....	21
2.3.2. Perfect Prog.....	23
2.3.3. Identificação de geadas .....	25
2.3.4. Análise de Composições .....	25
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>27</b>
3.1 PERFECT PROG.....	27
3.1.1. Análise do ciclo anual da temperatura mínima antes do <i>perfect prog</i> .....	27
3.1.2. Regressão Linear Múltipla .....	33
3.1.3. Análise do ciclo anual da temperatura mínima depois do <i>perfect prog</i> .....	35
3.2 IDENTIFICAÇÃO DE GEADAS.....	37
3.2.1. Frequência de geadas nos dados observados .....	37
3.2.2. Geadas nos dados simulados: Mudanças dos padrões de frequência .....	43
3.3 ANOMALIAS DE ANÁLISE DE COMPOSIÇÕES .....	47
3.3.1. Características sinóticas na ocorrência de geadas .....	48
3.3.2. Composições nas simulações.....	51
<b>4 CONCLUSÕES</b> .....	<b>63</b>
<b>5 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS</b> .....	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>75</b>
APÊNDICE A: EQUAÇÕES DAS REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS .....	75
APÊNDICE B: SÉRIES TEMPORAIS – AVALIAÇÃO DA REGRESSÃO.....	76
APÊNDICE C: FREQUÊNCIA DE GEADAS SEM O PERFECT PROG NA ZONA NORTE .....	82



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Localização do Peru na América do Sul, topografia e regiões climáticas.....	3
Figura 1.2	Umidade específica em 850 hPa ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em cores e linhas de corrente em 200 hPa. (a) DJF – verão. (b) JJA – inverno. Período 1971 – 2005. ....	5
Figura 1.3	Representação esquemática da maior resolução do MCR aninhado na grade do MCG. Adaptado do Instituto de Ciencias Ambientales de Castilla – La Mancha (Espanha) ( <a href="http://www2.aemet.es/web/sup/ciencia/divulga/escen_curso/pdf/Castro.pdf">http://www2.aemet.es/web/sup/ciencia/divulga/escen_curso/pdf/Castro.pdf</a> ).....	9
Figura 1.4	Domínios regionais do CORDEX ( <a href="http://www.cordex.org/">http://www.cordex.org/</a> ).....	10
Figura 2.1	Domínios utilizados e topografia (m). Domínio das simulações (quadro à esquerda). Domínio das análises (quadro à direita). Os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as caixas identificam as zonas analisadas: zona norte (ZN), zona central (ZC) e zona sul (ZS).....	17
Figura 2.2	Emissão de gases de efeito estufa dos cenários RCP. Fonte: Wayne (2013). ....	20
Figura 2.3	Exemplo do diagrama de Taylor. Adaptado de Taylor (2005). ....	22
Figura 3.1(a)	Ciclo anual da temperatura mínima para a zona norte (ZN) e (b) diagrama de Taylor correspondente. Período 1971 – 2005.....	28
Figura 3.2(a)	Ciclo anual da temperatura mínima para a zona centro (ZC) e (b) diagrama de Taylor correspondente. Período 1971 – 2005.....	29
Figura 3.3(a)	Ciclo anual da temperatura mínima e (b) seu diagrama de Taylor para a zona sul (ZS). ....	30
Figura 3.4	Distribuição espacial da temperatura mínima média do inverno para o período 1971 – 2005 para os dados observados com as estações meteorológicas (pontos verdes) (a), dados do CRU (b) e simulações (c, d, e, f). ....	32
Figura 3.5	(a) Série temporal da temperatura mínima observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação meteorológica. (b) Diagramas de Taylor de cada regressão linear múltipla. ....	34
Figura 3.6	Ciclo anual da temperatura mínima observada e $T_R$ para ZN (a), ZC (c) e ZS (e) e Diagrama de Taylor de cada ciclo anual para ZN (b), ZC (d) e ZS (f). Período 1971 – 2005.....	36
Figura 3.7	Frequência de geada observada para a ZN entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.....	38
Figura 3.8	Frequência de geada observada para a ZC entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.....	39
Figura 3.9	Frequência de geada observada para a ZS entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.....	40
Figura 3.10	Ciclo anual médio da frequência de geadas para o período presente para (a) ZN, (b) ZC e (c) ZS, calculado com dados observados. ....	41
Figura 3.11	(a) Frequência de geada do mês de novembro ao longo do período 1971 – 2005. (b) Dias com geadas no mês de novembro do ano 2000 para as estações meteorológicas da ZN com suas respectivas frequências. ....	42

Figura 3.12 Anomalia da (a) temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ) e (b) umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) do ar em 700 hPa para novembro de 2000 em relação aos dados do Era-Interim para o período 1971 – 2005.....	43
Figura 3.13(a) Ciclo anual médio da frequência de geadas para a ZN para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área.....	44
Figura 3.14(a) Ciclo anual médio da frequência de geadas para a ZC para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área.....	45
Figura 3.15(a) Ciclo anual da frequência de geadas para a ZS para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área.....	46
Figura 3.16 Ciclo anual da frequência de geadas, para o período futuro 2060 – 2090, calculado com os dados simulados da (a) ZN, (b) ZC e (c) ZS.....	47
Figura 3.17 Anomalias das composições às 00:00 UTC para as datas em que ocorrem geada no período 1971 – 2005: (a) Perfil vertical da velocidade vertical ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ – linhas). (b) Perfil vertical de vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ – linhas). (c) Umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 500hPa.....	48
Figura 3.18 Anomalia da composição de temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ - sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ – linhas) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005. As caixas representam as zonas de análise (ZN, ZC e ZS). .	49
Figura 3.19 Anomalia da composição de radiação de onda longa – OLR ( $\text{W m}^{-2}$ ) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005.....	50
Figura 3.20 Média climatológica do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) em 500hPa no inverno para o período 1971 – 2005.....	51
Figura 3.21 Perfil vertical da anomalia das composições da velocidade vertical ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ – linhas), às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM. (c) RegGFDL e (d) RegMPI.....	52
Figura 3.22 Perfil vertical da anomalia das composições da vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ – linhas), às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI.....	53
Figura 3.23 Anomalia das composições da umidade específica ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) e velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) em 500hPa, às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI.....	54
Figura 3.24 Anomalia da composição de temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ - sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ – linhas) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI. As caixas representam as zonas de análise (ZN, ZC e ZS). .....	56
Figura 3.25 Perfil vertical da anomalia das composições da velocidade vertical ômega ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ – linhas), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI.....	57

Figura 3.26 Perfil vertical da anomalia das composições da vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ – linhas), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI. ....	58
Figura 3.27 Anomalia das composições da umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI. ....	60
Figura 3.28 Anomalia da composição da temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ – sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ ), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI. ....	61
Figura B.1 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZN. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla. ....	76
Figura B.2 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZC. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla. ....	77
Figura B.3 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZS. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla. ....	78
Figura C.4 Ciclo anual da frequência de geadas sem aplicar o perfect prog na ZN para o período 1971 – 2005.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Configurações das simulações climáticas com o RegCM4. Adaptado de Llopart (2014). .....	18
Tabela 2.2 Descrição das características dos modelos globais e dados de reanálise utilizados nas condições iniciais e de contorno na geração das simulações. ....	19
Tabela 2.3 Preditores e preeditandos considerados no <i>perfect prog.</i> (* indica variável de superfície).....	24
Tabela 3.1 Bias sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona norte (ZN). .	28
Tabela 3.2 Bias sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona centro (ZC).	29
Tabela 3.3 Bias sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona sul (ZS).....	31
Tabela 3.4 Equações da regressão linear múltipla para três estações meteorológicas.....	33
Tabela A.1 Equações da regressão linear múltipla das estações meteorológicas .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS

AB: Alta da Bolívia  
APS: Anticiclone do Pacífico Sul  
AAS: Anticiclone do Atlântico Sul  
CA: Cordilheira dos Andes  
CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5  
CRU: Climate Research Union  
FAO: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura  
GFDL: Modelo global GFDL-ESM2M  
HadGEM: Modelo global HadGEM2  
INDECI: Instituto Nacional de Defesa Civil do Peru  
LT: Lago Titicaca  
MCG: Modelo climático global  
MCR: Modelo climático regional  
MPI: Modelo global MPI-ESM-MR  
OLR: Radiação de onda longa  
RCP: Representative Concentration Pathways  
RegCM4: Regional Climate Model versão 4  
SENAMHI: Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia do Peru  
ZCIT: Zona de Convergência Intertropical  
ZC: Zona Centro  
ZN: Zona Norte  
ZS: Zona Sul  
WMO: World Meteorological Organization

# 1 INTRODUÇÃO

Regiões dos países da América do Sul que ocupam parte da Cordilheira dos Andes são vulneráveis aos impactos das geadas. No caso do Peru, 21% da população é afetada econômica e socialmente por estes eventos na época do inverno austral, devido a seu impacto nas culturas e na pecuária utilizados na própria alimentação. Cada ano tem-se perdas na colheita de batata, milho, feijão e quinoa, assim como no rendimento do gado como as lhamas, alpacas e vicunhas (Comunidad Andina, 2009).

Na atualidade, os modelos climáticos constituem uma metodologia importante para análise e previsão climática. Estes modelos geram cenários climáticos que permitem conhecer a vulnerabilidade de uma região diante uma possível mudança dos eventos meteorológicos. É assim que as projeções futuras de modelos climáticos são usadas em muitos estudos para determinar tendências futuras da temperatura do ar e precipitação no globo. Isso nos motivou esta pesquisa a determinar tendência futura de geadas na serra peruana e, desta forma, prover a sociedade informações para futuras medidas de adaptação para as atividades.

## 1.1. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é analisar a mudança futura da ocorrência das geadas na serra peruana utilizando diferentes simulações climáticas do MCR *Regional Climate Model* versão 4 (RegCM4).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- ❖ Identificar as geadas nos dados observados.
- ❖ Entender os padrões sinóticos predominantes durante a ocorrência de geadas.
- ❖ Analisar a acurácia das simulações climáticas para representar o ciclo anual da temperatura mínima observada.
- ❖ Identificar geadas nos dados simulados e avaliar a tendência futura.

Os resultados desta pesquisa podem contribuir aos planos de prevenção e mitigação dos impactos originados por estes eventos meteorológicos extremos.

## **1.2. Revisão Bibliográfica**

### **1.2.1. O clima do Peru e importância dos Andes**

Por se localizar na zona tropical do hemisfério sul, entre a linha equatorial e o Trópico de Capricórnio nas latitudes 00°01'S e 18°20'S, o Peru poderia estar associado a um clima tropical em todo o território, com uma estação chuvosa e outra seca. Porém, os diversos fatores atmosféricos e geográficos como o anticiclone do Pacífico Sul (APS) e a corrente fria de Humbolt, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a corrente oceânica do Niño (Sampaio, 2001; IGP, 2014), a bacia amazônica e a Cordilheira dos Andes (CA) fazem com que o país tenha uma grande diversidade de climas, com características dos climas tropicais e de latitudes médias e altas. A Cordilheira dos Andes funciona como uma importante barreira climática que divide ao país em três regiões climáticas distintas: litoral, serra e selva.

O APS e a corrente de Humbolt são os fatores predominantes para determinar o clima árido subtropical do litoral centro e sul por apresentar temperaturas baixas que ajuda a intensificação da inversão térmica próxima à superfície, muita nebulosidade baixa e umidade atmosférica que, no inverno, geram fracas precipitações em forma de garoa. A ZCIT e a corrente do Niño de águas quentes influem no clima árido tropical do litoral norte organizando algumas precipitações no verão que se intensificam no fenômeno El Niño. A bacia amazônica funciona como uma fonte de umidade continental que proporciona um clima subtropical e tropical úmido no lado oriental da Cordilheira dos Andes e na zona baixa da selva, respectivamente com precipitação anual de até 2000 milímetros e temperaturas diurnas maiores de 25°C (Bazo, 2014). A região serra abrange quase toda a CA e, devido à topografia irregular, apresenta uma grande quantidade de climas que vão desde o quente até o frio polar. No verão, acontecem as maiores precipitações de origem orográfica e, no inverno, a temperatura noturna atinge valor negativo. Nas zonas próximas a lagunas ou lagos, como o

Lago Titicaca (LT), a amplitude térmica é menor devido ao efeito termorregulador da água o que inibe a queda da temperaturas noturna quando comparada com as vizinhanças.

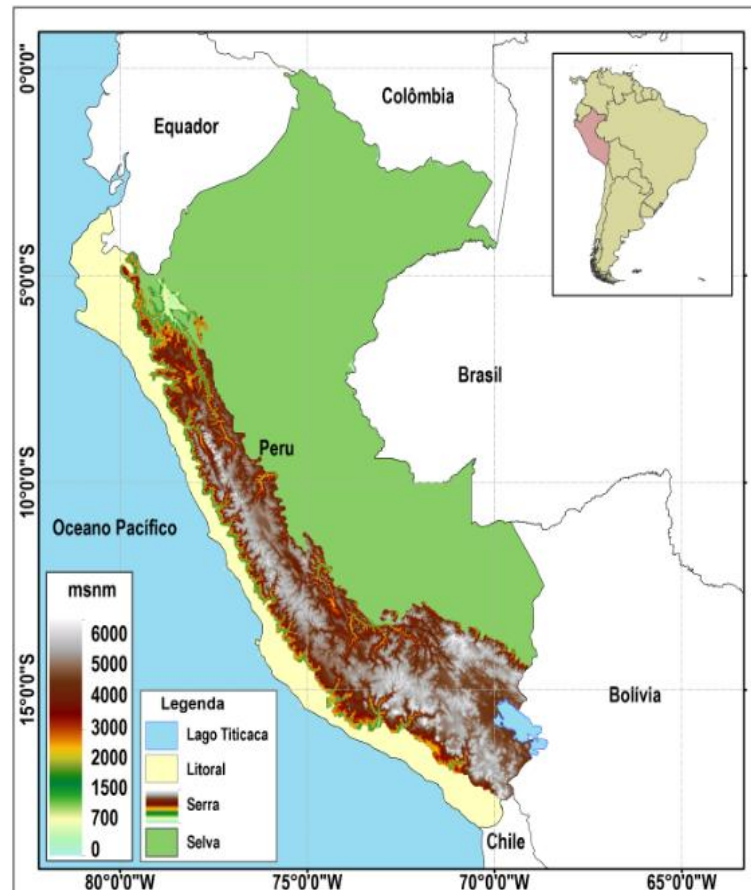


Figura 1.1 Localização do Peru na América do Sul, topografia e regiões climáticas.

Além da importância na geração de diversos climas, a Cordilheira dos Andes é fundamental no início e continuidade dos principais sistemas hidrológicos que abastecem ao litoral peruano e a bacia amazônica, com a formação de gelo nos altos picos e nevados que apresenta. Os recursos minerais também são parte importante destas montanhas, com empresas mineradoras de ouro, prata, cobre, zinco, ferro, carvão, etc. Já a topografia irregular proporciona condições para o desenvolvimento das atividades agrícolas e pecuárias que providencia de alimentos à população do país.

Assim como a CA tem considerável importância nas atividades econômicas do país, também dá lugar a eventos meteorológicos que impactam a população. O verão é propício para eventos forçados convectivos e orográficos, influenciados pela ZCIT e pela formação da



Alta da Bolívia (AB) nos altos níveis da troposfera, que originam fortes precipitações. Estas chuvas provocam enchentes nas cidades andinas e deslizamentos de terra nas encostas da CA. Entretanto, no inverno, os eventos de frio são os que mais impactam as atividades da população desta região, assim como as nevascas e geadas.

As nevascas consistem em precipitação de pequenos cristais de gelo conhecidos como neve. Segundo o Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia do Peru (SENAMHI), as nevascas no Peru ocorrem normalmente nas localidades acima dos 3500 m e ocasionam queda nas temperaturas máximas devido à grande quantidade de nebulosidade. As nevascas estão associadas a sistemas de baixa pressão, provenientes do Oceano Pacífico, em altos níveis da atmosfera (aproximadamente a 5000 m) com intensos ventos que resfriam o ar quente e úmido da Amazônia e o transportam para a serra, provocando as precipitações frias (INDECI, 2008).

Por outro lado, as geadas correspondem à formação de gelo na superfície do solo ou sobre as plantas pela queda de temperatura mínima do ar, atingindo valores iguais ou menores de 0°C, o que geralmente acontece durante a madrugada ou ao nascer do sol (Comunidad Andina, 2009). As geadas podem ser classificadas em geadas por advecção ou geadas radiativas. As geadas advectivas são produzidas pela entrada de massas de ar frio das regiões de latitudes mais altas para o continente e, algumas vezes, atingem países como Bolívia e Peru. As geadas radiativas são originadas pela perda de radiação da superfície nas noites de céu aberto, ventos calmos e baixa concentração de vapor de água na atmosfera (FAO e SENAMHI, 2010). Estes são justamente os eventos de geadas que serão estudados nesta pesquisa por serem os mais frequentes em altitudes acima dos 2500 m (Comunidad Andina, 2009). Nestas altitudes, a população cultiva alimentos para o próprio consumo e/ou abastecimento para outras cidades e tem pouca capacidade para programar políticas de prevenção para as perdas econômicas.

### 1.2.2. Circulação atmosférica na Cordilheira Andina

A variabilidade topográfica da CA favorece as geadas, que podem ocorrer em qualquer época do ano, mas no inverno apresentam maior frequência e intensidade em função das condições atmosféricas (INDECI, 2008). Os sistemas atmosféricos que controlam os períodos úmidos e secos na CA da parte peruana são: a ZCIT, o APS e AB (Martínez *et al.*, 2012).

O período úmido anual na parte peruana da CA corresponde aos meses entre outubro e abril (Mota, 2003). Nesse período, a ZCIT posiciona-se mais ao sul do continente fornecendo umidade para a parte norte da CA (García, 2007); enquanto que, na zona central e sul, a precipitação está mais relacionada com a mudança do vento zonal em médias e altas camadas da troposfera (Garreud *et al.*, 2003). A liberação do calor latente, devido à intensa convecção na Amazônia, junto com o calor sensível devido ao aquecimento da CA, gera um sistema de circulação estável nos níveis altos da troposfera chamado AB (Figura 1.2a). A Alta da Bolívia ajuda a manter a convecção na CA através da advecção de umidade da Amazônia dos altos níveis (Martínez *et al.*, 2012; Garreud e Aceituno, 2001).

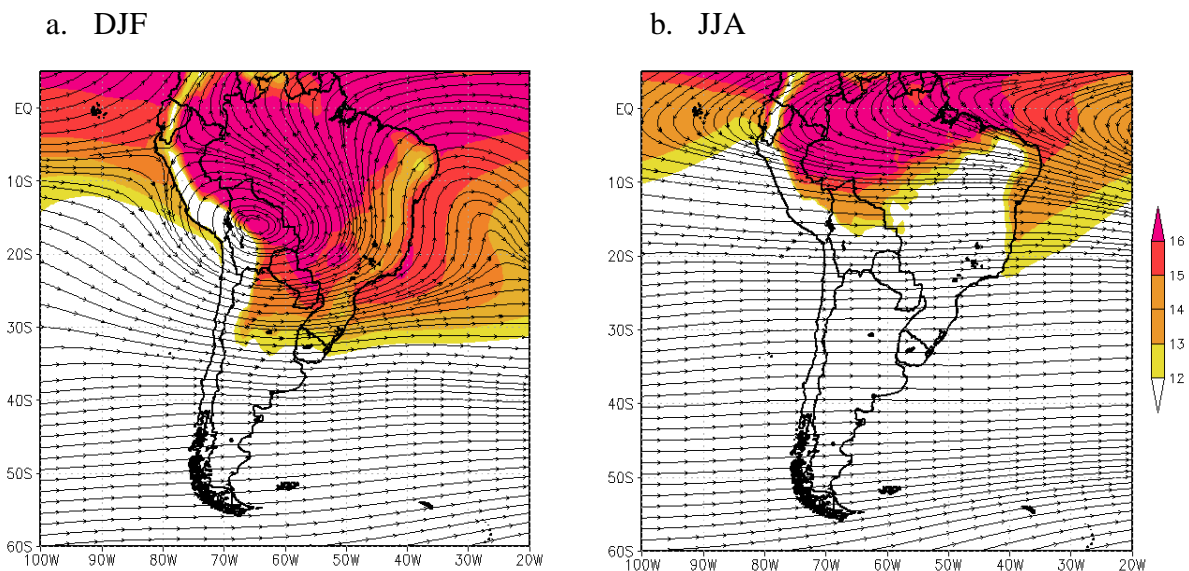


Figura 1.2 Umidade específica em 850 hPa ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em cores e linhas de corrente em 200 hPa. (a) DJF – verão. (b) JJA – inverno. Período 1971 – 2005.

Já para o período seco, a umidade diminui drasticamente devido ao afastamento da ZCIT para o norte e da desorganização da AB (Figura 1.2b). Nos meses do inverno, os ventos

zonais de oeste na alta troposfera são predominantes e o APS torna-se um sistema dominante posicionando-se mais para o norte do continente. O APS é um sistema que induz condições estáveis nos baixos níveis da atmosfera do lado oeste do continente e devido à subsidência, é assim a umidade do oceano conserva-se próxima da superfície o que inibe a convecção e o transporte de umidade do Oceano Pacífico para a CA (Martínez *et al.*, 2012). Esse panorama mantém a CA com pouca nebulosidade e mais vulnerável às baixas temperaturas do ar e aos eventos de geadas; só na zona do Lago Titicaca amortecem-se as condições frias pelo efeito termorregulador.

Os sistemas de circulação atmosférica descritos controlam as condições atuais térmicas e de precipitação na zona andina, mas esses estariam sofrendo alterações. Vuille *et al.* (2003) realizaram um estudo das tendências históricas para o século XX da temperatura do ar, precipitação e cobertura de nuvens para a parte andina peruana e boliviana. No verão, a tendência da precipitação e cobertura de nuvens foi positiva para a zona norte e sudeste da CA; já para a zona sudoeste as tendências foram negativas. No inverno, Vuille *et al.* (2003) encontraram uma tendência ligeiramente positiva da precipitação e cobertura de nuvens. Enquanto isso, a tendência da temperatura média anual na CA foi positiva. Estes resultados são similares aos obtidos por Martínez *et al.* (2012), onde a tendência histórica das temperaturas máximas e mínimas foram positivas para essa região. Vuille *et al.* (2003) também identificou que, nas maiores altitudes, o aquecimento foi maior se comparado com a parte leste mais baixa da CA, porém menor que no lado oeste.

### **1.2.3. Tendências passadas e futuras de geadas no globo**

As tendências históricas positivas de temperatura não foram identificadas só na CA. Easterling *et al.* (1997) analisaram dados de 100 anos de temperatura máxima e mínima de vários países e encontraram tendências positivas para todas as estações do ano. No caso da estação do inverno, o hemisfério sul apresentou tendências positivas de 1,27°C e 1,41°C para a temperatura máxima e mínima, respectivamente. No hemisfério norte, as tendências foram menores, sendo de 0,25°C para a temperatura máxima e de 1,05°C para a mínima. Esse incremento na temperatura mínima pode influenciar a tendência atual de geada no globo,

desde que esta variável meteorológica seja utilizada na identificação de eventos de geadas. Contudo, a ocorrência ou não de geadas também depende de situações locais de cada região.

Por exemplo, na Austrália Zheng *et al.* (2015) identificou, entre 1957 e 2013, um incremento de dias com geadas nas zonas oeste, sul e sudeste do país, e uma diminuição de dias com geadas na zona leste. Os resultados do estudo de Dittus *et al.* (2015) indicam que o aumento de dias com geadas na zona sudeste da Austrália aconteceu ao final da estação de outono (maio), e que para os meses do inverno (junho, julho e agosto) a tendência indica diminuição dos dias com geadas no decorrer do período analisado. A zona sudoeste apresenta um incremento de dias com geadas no início da primavera, o que impacta nas atividades de agricultura.

O estudo realizado em Kansas, Estados Unidos, por Anandhi *et al.* (2013) permitiu avaliar os dias com geadas em quatro períodos distintos (1919; 1920 – 1949; 1950 – 1979; 1980 – 2009). A tendência encontrada foi de diminuição de dias com geadas na maior parte das estações meteorológicas usadas para os quatro períodos analisados; apenas o último período mostrou um incremento de dias com geadas ao leste do estado. Os autores obtiveram maior quantidade de estações meteorológicas com tendência negativa de dias com geada na estação de primavera e inverno. Os autores sugerem que essas tendências estejam correlacionadas com o incremento da temperatura mínima do ar também analisada no estudo.

As montanhas de Nova Iorque, nos Estados Unidos, são de grande importância por conterem as principais reservas de água e abastecerem 90% das necessidades hídricas do município, por isso as tendências dos eventos de geadas foram analisadas no período 1960 – 2008 (Anandhi *et al.*, 2012). Os autores calcularam seis índices de geadas para seis bacias hidrográficas, entre eles o índice de dias com geadas (nFDs), o índice de meses com geadas (nFMs) e o índice de duração da estação de geadas (FSL). Os três índices mencionados mostraram tendência negativa no período analisado para as seis bacias consideradas.

A tendência de geadas também foi calculada para o Iran no período 1951 – 2005 (Rahimi, 2011). Foi encontrado um valor médio de 2,6 dias com geada a menos por década. A maior diminuição detectada foi de 13 dias por década no nordeste do país e o maior aumento

de 7,4 dias por década na parte oeste. Este autor observou que apenas 15% do território experimentou um aumento de dias com geadas, enquanto que os 85% restantes experimentaram diminuição.

Keggenhoff *et al.* (2014) fizeram uma pesquisa sobre as tendências dos extremos de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, no período 1971 – 2010, para Georgia, país localizado no limite entre Europa e Ásia com uma topografia que varia entre 1500 e 5000 metros. Os extremos de temperatura, expressos por vários índices climáticos, apresentaram tendência de aquecimento; desta forma no ano 2010 registrou-se 13,3 dias a menos de geadas que no ano 1971, assim como, 13,6 dias a mais de verão e 7,0 noites mais quente. Outra região do globo com elevada topografia é o Platô Tibetano. Liu *et al.* (2006) analisaram as tendências dos eventos extremos de temperatura no período 1961 – 2003 para as zona oeste e central do Platô. Estes autores obtiveram também tendência positiva da temperatura mínima e, com isso, diminuição dos dias com geada, principalmente a partir de 1990.

Da mesma forma, foram investigadas as tendências futuras das geadas com ajuda de projeções futuras de modelos climáticos globais (MCGs) ou modelos climáticos regionais (MCRs). Anandhi *et al.* (2012), no trabalho feito para o município de New York, também analisou os índices nFDs, nFMs e FSL para os períodos 2045 – 2065 e 2080 – 2100 utilizando técnicas de *downscaling* para as simulações de um MCG do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3* (CMIP3). Nos dois períodos futuros considerados, os três índices apresentaram uma tendência de diminuição, com maior intensidade no período 2080 – 2100.

O trabalho de Meehl *et al.* (2004) apresenta a análise de simulações do MCG *Energy Parallel Climate Model* (PCM) do *National Center for Atmospheric Research/Department* com uma grade de 2,8° x 2,8° para o século XXI. A tendência do número de dias com geada para as regiões oeste e sudoeste dos Estados Unidos foi negativa, o que esteve associado ao aumento da temperatura mínima e dos gases de efeito estufa. Desta forma, as projeções futuras dos modelos contribuem para a construção de cenários climáticos das mudanças de geadas nas futuras décadas.

#### 1.2.4. Modelagem climática regional na América do Sul

Na atualidade, a modelagem climática constitui uma metodologia importante em vários âmbitos de estudo, tais como a análise tempo – espacial dos eventos meteorológicos, impactos de mudanças climáticas e a elaboração das previsões do clima.

Os modelos de circulação global (MCGS) são utilizados para modelagem climática e buscam representar as condições do clima para todo o globo, usando as soluções numéricas integradas no tempo e parametrizações dos processos atmosféricos que não podem ser resolvidos explicitamente na grade do modelo, como a formação de nuvens, processos radiativos e de camada limite (Bazo, 2014). Os modelos de circulação global dificultam a análise dos impactos das mudanças climáticas devido à baixa resolução espacial com que são executados, limitando a representação do clima regional.

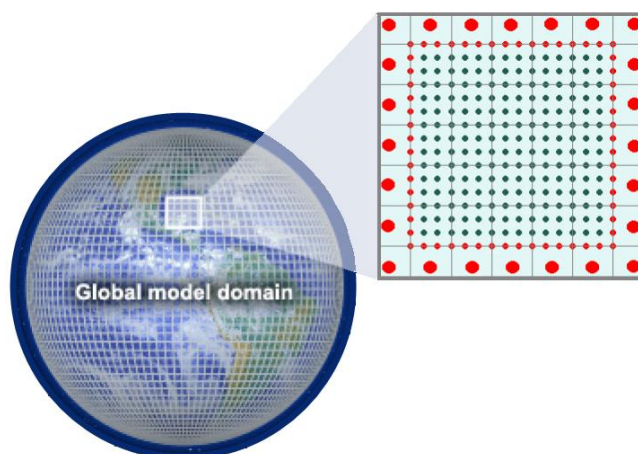


Figura 1.3 Representação esquemática da maior resolução do MCR aninhado na grade do MCG. Adaptado do Instituto de Ciencias Ambientales de Castilla – La Mancha (Espanha) ([http://www2.aemet.es/web/sup/ciencia/divulga/escen\\_curso/pdf/Castro.pdf](http://www2.aemet.es/web/sup/ciencia/divulga/escen_curso/pdf/Castro.pdf)).

Visando melhorar os resultados dos MCGs, são utilizados os modelos climáticos regionais (MCRs) com maior resolução espacial e maior detalhamento dos processos físicos locais para representar de forma mais realista o clima regional (Reboita *et al.*, 2014). O início do modelamento climático regional ocorreu com Dickinson *et al.* (1989) e Giorgi (1990). A Figura 1.3 representa a técnica de regionalização que consiste na utilização dos dados dos MCGs, ou dados de análise, como condições iniciais e de contorno para gerar as simulações

climáticas dos MCRs (Llopart, 2014; Reboita *et al.*, 2014). Limitações técnicas referentes ao downscaling constituem a propagação dos erros sistemáticos dos MCGs e a falta de interação dos MCRs com os MCGs (Bazo, 2014).

No ano de 2009, foi criado o projeto CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiments*) com o objetivo de melhorar cada vez mais as técnicas de regionalização climática (Giorgi *et al.*, 2009). Esse projeto propõe produzir um conjunto de projeções climáticas regionais com vários modelos para as diferentes partes do globo e, também, um protocolo comum para os usuários dos MCRs, como por exemplo, os domínios das simulações climáticas no globo (Figura 1.4).

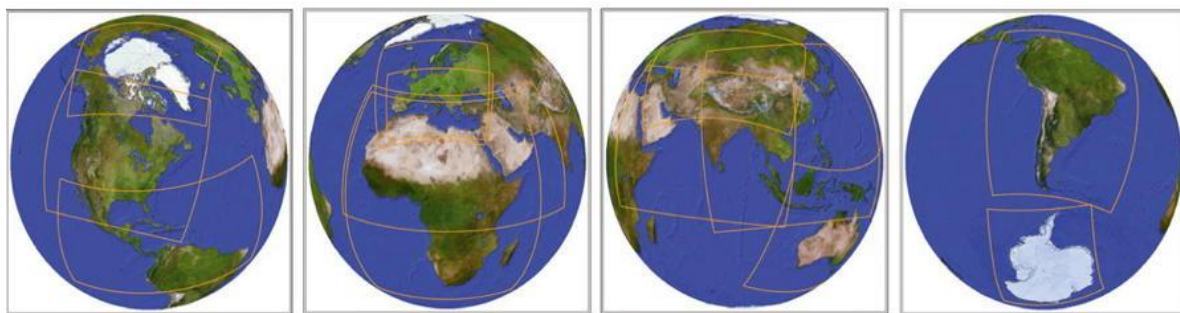


Figura 1.4 Domínios regionais do CORDEX (<http://www.cordex.org/>)

Nesse contexto, os estudos para a América do Sul usando modelos regionais abordam temas sobre a habilidade dos MCR para simular o clima presente, sensibilidade dos esquemas de parametrizações físicas e projeções climáticas futuras. Entre eles, Fernandez *et al.* (2006) mostraram que dois modelos regionais implementados no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), o RegCM3 (*Intercantional Centre of Theoretical Physics – ICTP*) e a versão climática do Eta (EtaClim), tinham a capacidade de simular as características climáticas observadas durante o verão sobre a América do Sul.

Nicolini *et al.* (2002) compararam simulações climáticas regionais do sistema de modelagem CSIRO Mk 2 – DARLAM dos meses de janeiro e julho com os dados observados mediante técnicas estatísticas como o padrão de correlações, o erro médio quadrático e o bias. Os autores demonstraram que DARLAM melhora significativamente a temperatura próxima à superfície e a pressão no nível médio do mar, assim como os padrões dos ventos em altos

níveis da Alta da Bolívia. Mas no caso da precipitação mensal nos Andes, o DARLAM superestima os valores, situação que também acontece em outras regiões com similares características irregulares da orografia.

Rodrigues e Marengo (2008) estudaram os fluxos de umidade e o Jato de Baixos Níveis (JBN) ao leste dos Andes com o MCR HadRM3P para os períodos 1980 – 1989 (clima presente) e 2080 – 2089 (clima futuro considerando um cenário de alta emissões de gases de efeito estufa). Os resultados indicaram aumento do transporte de umidade da bacia Amazônica para a bacia do Prata devido à intensificação do JBN do que no apresentado no clima presente.

Reboita *et al.* (2014) analisaram a influência dos esquemas de parametrizações físicas do modelo regional RegCM4.3 na simulação da precipitação e da temperatura sobre o domínio CORDEX para a América do Sul. Os esquemas de parametrizações físicas usados foram: para processos de superfície, o Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) e o Community Land Model (CLM); para processos convectivos, o Tiedtke, Mixed1 (esquema Grell no continente e Emanuel no oceano) e Mixed2 (Emanuel no continente e Grell no oceano). Os resultados do trabalho mostraram que, para a América do Sul, a simulação da precipitação melhora utilizando a combinação dos esquemas BATS e Mixed1, enquanto que a temperatura do ar é melhor representada com os esquemas CLM e Emanuel.

A parte da CA também tem sido objeto de estudo nas projeções climáticas futuras com modelos regionais. Urrutia e Vuille (2009) usaram dois diferentes cenários de emissões do *Hadley Centre Regional Climate Modeling System*, no projeto denominado PRECIS, que é baseado na terceira geração do *Hadley Centre Regional Climate Model* (HadRM3) para analisar as projeções das possíveis mudanças climáticas na CA no século XXI. As projeções indicaram um aquecimento significativo na zona de estudo, principalmente nas partes com maiores altitudes, assim como o incremento da variabilidade interanual da temperatura. Igualmente, Marengo *et al.* (2010) obtiveram um aumento de temperatura, de 3°C a 5°C, no inverno para a mesma área.



Sanabria *et al.* (2009) geraram cenários futuros de mudanças climáticas com três modelos regionais (ETA CCS, HadRM3 e RegCM3) sobre a região do Altiplano peruano. Os resultados para a temperatura indicaram que os modelos HadRM3 e ETA CCS representaram melhor o ciclo anual. Em adição, as projeções futuras desses modelos, tanto para os cenários com altas e baixas concentrações de CO<sub>2</sub>, simularam incrementos de 2°C a 4°C na temperatura sobre a região.

Thibeault *et al.* (2010) examinaram projeções de oito índices de precipitação e temperatura extrema com modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* versão 3 (CMIP3) sobre o Altiplano boliviano, e as compararam com índices calculados a partir de observações. De todos os índices analisados, o índice de dias com geadas apresentou diferenças entre projeções e observações. Segundo as projeções em relação ao clima presente, o número de dias com geada mostra tendência negativa; enquanto o número de dias com geada calculado a partir dos dados observados indica tendência positiva. O *bias* quente e úmido que apresentam os modelos usados sugerem que a diminuição dos dias com geadas pode não acontecer tão cedo ou ser tão grande como o projetado pelos modelos do CMIP5.

Valdivia *et al.* (2013) estudaram as tendências do clima presente (14 estações meteorológicas) e projeções futuras (simulações do CMIP3) no Altiplano peruano e analisaram as ferramentas necessárias para a adaptação favorável diante das mudanças climáticas nessa região. As tendências do clima presente indicaram diminuição da precipitação nos primeiros meses do período chuvoso (outubro – dezembro) e incremento da temperatura máxima. A temperatura mínima mostrou incremento no inverno nas regiões norte e centro do Altiplano, enquanto que no sul, a temperatura mínima indicou diminuição dos valores, o que pode estar relacionado com o incremento da desertificação que reduz o vapor de água na atmosfera. Nas projeções futuras, o número de noites quentes e amplitude térmica extrema apresentaram tendências positivas, já o índice de dias com geadas e a umidade no solo tiveram tendências negativas. Segundo Valdivia *et al.* (2013), a possível combinação de temperaturas maiores, mudanças na intensidade de precipitação e diminuição de umidade no solo no futuro aumentam os riscos para a agricultura, portanto é necessário desenvolver vínculos entre o conhecimento dos agricultores e cientistas.

Andrade e Blacutt (2010) avaliaram simulações do MCR PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*) com dados observados de temperatura e precipitação mensal na Bolívia para o período 1961 – 1990. O modelo representa adequadamente o comportamento da temperatura e precipitação em zonas de altitude menor que 500 m, mas para zonas com altitudes maiores, o PRECIS subestima a temperatura média e máxima. No caso da temperatura mínima, é a variável melhor representada pelo modelo para Bolívia. A precipitação é superestimada em zonas com altitudes maiores que 500 m, aumentando a intensidade em regiões com grande variabilidade da topografia.



## 2 DADOS E METODOLOGIA

A seguir são descritos o modelo RegCM4, os dados utilizados no presente trabalho e a metodologia empregada nas análises realizadas.

### 2.1 O modelo climático RegCM4

As simulações climáticas usadas nesta pesquisa foram geradas com o MCR RegCM4. O RegCM4 é um modelo regional que resolve as equações para uma atmosfera compressível, hidrostático, com coordenada vertical sigma pressão e de área limitada, fator que permite o aumento da resolução espacial (Dickinson *et al.*, 1989), e inclui um algoritmo para reduzir a difusão horizontal na presença de intensos gradientes de topografia (Giorgi *et al.*, 1993 a-b). No modelo, as equações primitivas são discretizadas através do método de diferenças finitas na grade B de Arakawa-Lamb, na qual a velocidade do vento e as variáveis termodinâmicas são horizontalmente escalonadas (Giorgi *et al.*, 2012).

Desde a primeira versão, o RegCM vem sofrendo melhorias nas parametrizações físicas como o processo de convecção, processos de superfície, entre outras. A última versão têm dois esquemas para representar os processos de superfície: o Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) e o Community Land Model (CLM) desenvolvidos por Dickinson *et al.* (1993) e Oleson (2004), respectivamente. O BATS considera três camadas de solo, duas camadas de temperatura de solo, uma camada de neve e uma camada de vegetação. Já o CLM foi implementado recentemente e possui dez camadas de solo, cinco camadas de neve acima da superfície e uma camada de vegetação para calcular as variáveis de superfície. Uma característica do CLM é que divide cada célula da grade em subgrades de unidades de terra com diferentes frações para o uso de solo; além disso, os cálculos biogeofísicos incluem processos de fotossíntese (Giorgi *et al.*, 2012).

Para o caso dos processos convectivos, o RegCM4 tem as seguintes opções de esquemas: Kuo (Anthes *et al.*, 1987), Tiedtke (Tiedtke, 1989), Grell (Grell, 1993) e Emanuel (Emanuel e Zivkovic-Rothman, 1999), sendo que as duas últimas podem se misturar para o

continente e o oceano (Llopart, 2014). Neste trabalho foi utilizado só o esquema Emanuel onde a convecção é ativada quando o nível de fluatibilidade é maior que o nível da base das nuvens ou nível de condensação por levantamento (Llopart, 2014; Reboita *et al.*, 2014).

## **2.2 Descrição dos dados**

Os dados utilizados são divididos em quatro partes: dados observados de estações meteorológicas (referidos a partir daqui como dados observados), dados das simulações do modelo RegCM4 (referidos a partir daqui como dados simulados), dados do *Climate Research Unit* (CRU) e dados de reanálise Era-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

### **2.2.1. Dados de estações meteorológicas**

Visto que as geadas são identificadas pela temperatura mínima, foram utilizados dados diários dessa variável de 49 estações meteorológicas pertencentes à rede do Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia do Peru (SENAMHI). Essas estações estão localizadas na região serrana com altitude maior que 2500 m, com a finalidade de garantir o registro de geadas segundo a Atlas de geadas do Peru (2010). O período dos dados foi de 1971 – 2005. Estes dados apresentam um controle básico de qualidade realizado pelo SENAMHI, portanto se passou a fazer um controle de qualidade com o software RClindex (Zhang e Yang, 2004) que permite identificar séries temporais incongruentes mediante análise de *outliers* e correlação com as estações vizinhas mais próximas. Também, eliminaram-se estações que apresentavam 15% de dados faltantes (Bazo, 2014). Além disso, excluíram-se as estações que são representadas por um mesmo ponto de grade do modelo.

Depois da aplicação dos critérios mencionados, restaram 18 estações meteorológicas para o estudo de geadas. A região de análise foi dividida em três: a zona norte da Cordilheira dos Andes (ZN), a zona central (ZC) e a zona sul (ZS). As estações foram distribuídas da seguinte forma: 4 estações na ZN, 3 estações na ZC e 11 estações na ZS. Vale ressaltar que a

metodologia do trabalho foi aplicada para cada ponto de estação, sendo que depois foi calculada a média das estações correspondentes para cada zona de análise, e assim, apresentar os resultados de geada para cada área. A Figura 2.1 mostra os domínios das análises e a localização das estações meteorológicas.

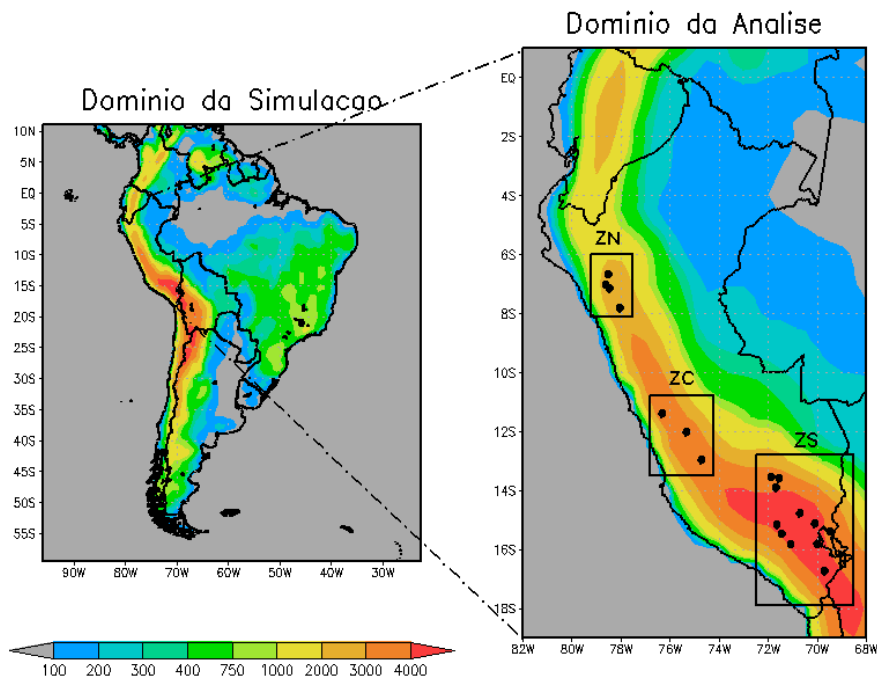


Figura 2.1 Domínios utilizados e topografia (m). Domínio das simulações (quadro à esquerda). Domínio das análises (quadro à direita). Os pontos representam a localização das estações meteorológicas e as caixas identificam as zonas analisadas: zona norte (ZN), zona central (ZC) e zona sul (ZS).

### 2.2.2. Dados das simulações do modelo RegCM4

Para atingir o objetivo principal da pesquisa, foram utilizados 4 simulações climáticas do modelo RegCM4 com as configurações mostradas na Tabela 2.1. Essas simulações foram geradas no trabalho de doutorado de Llopart (2014) e todas utilizaram o CLM como parametrização de superfície e a Emanuel como parametrização de convecção. Vale ressaltar que a combinação destas duas parametrizações representa de forma mais realística a temperatura observada na América do Sul (Reboita *et al.*, 2014).

As três primeiras simulações, o RegHadGEM, RegGFDL e RegMPI foram geradas com condições iniciais e de contorno dos MCGs HadGEM, GFDL e MPI, respectivamente, os quais fazem parte do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5; Meehl e Bony 2011); enquanto que a simulação denominada RegERAInterim foi gerada com dados da reanálise Era-Interim. Uma pequena descrição dos modelos globais e dados de reanálise utilizados na geração das simulações é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 Configurações das simulações climáticas com o RegCM4. Adaptado de Llopart (2014).

<b>Simulação</b>	<b>Condições iniciais e de contorno</b>	<b>Tempo de integração</b>	<b>Períodos analisados</b>
<b>RegHadGEM</b>	HadGEM	1970 - 2100	1971 – 2005 2060 – 2090
<b>RegGFDL</b>	GFDL	1970 - 2100	1971 – 2005 2060 – 2090
<b>RegMPI</b>	MPI	1970 - 2100	1971 – 2005 2060 – 2090
<b>RegERAInterim</b>	Era-Interim	1979 - 2008	1980 – 2005

O período de integração das simulações que empregam dados dos MCGs compreende 1970 – 2100, mas apenas foram selecionados dois períodos para as análises: climatologia do presente (1971 – 2005) e do futuro (2060 – 2090). Já para a simulação Era-Interim, o período de integração é 1979 – 2008 em função da disponibilidade dos dados, e o período de análise foi 1980 – 2005. Em todas as simulações o primeiro ano da integração foi descartado e considerado como período *spin-up* (Llopart, 2014).

O domínio das simulações segue as especificações do CORDEX, desde 65°S – 25°N e 120°W – 0°W, com 50 km de espaçamento de grade e 18 níveis verticais sigma pressão (Llopart, 2014). As projeções futuras das simulações (2006 – 2100) foram geradas sob o cenário *Representative Concentration Pathways - RCP8.5* (Riahi *et al.* 2007). Esse cenário é caracterizado pelo incremento de emissão de gases de efeito estufa no tempo (Figura 2.2), além de ser considerado o mais pessimista dos RCPs propostos pelo CMIP5.

Tabela 2.2 Descrição das características dos modelos globais e dados de reanálise utilizados nas condições iniciais e de contorno na geração das simulações.

Condição inicial/contorno	Descrição
<u>HadGEM</u> (Martin <i>et al.</i> , 2011)	O modelo global HadGEM2 é utilizado por o <i>Met Office Hadley Centre</i> para as simulações do CMIP5 e apresenta um modelo atmosférico de resolução horizontal 1.875° x 1.25° com 38 níveis na vertical, e um modelo oceânico com resolução de 1° na horizontal (aumentando para 0,33° no equador) com 40 níveis na vertical.
<u>GFDL</u> (Dunne <i>et al.</i> , 2012)	O modelo global GFDL-ESM2M foi desenvolvido por a <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (NOAA) e usa um modelo atmosférico com resolução horizontal 2° x 2,5° e 24 níveis verticais, e um modelo oceânico <i>Modular Ocean Model</i> versão 4p1 com resolução de 1° na horizontal.
<u>MPI</u> (Giorgetta <i>et al.</i> , 2013)	O modelo global MPI-ESM-MR do <i>Max Planck Institute for Meteorology</i> apresenta uma resolução horizontal de 1,5° x 0,4° e 95 níveis verticais.
<u>Era-Interim</u> (Dee <i>et al.</i> , 2011)	O Era-Interim são dados de reanálise gerados pelo <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> (ECMWF) e compreendem o período de 1979 até 2015 com resolução espacial de 1,5° x 1,5°, 3 horas de resolução temporal e 37 níveis de resolução vertical.

As variáveis meteorológicas das simulações usadas para a análise das geadas foram: temperatura mínima diária do ar a 2 metros (°C), temperatura do ar (°C), componente U e V do vento ( $m s^{-1}$ ), a velocidade vertical ômega ( $Pa s^{-1}$ ) e a umidade específica ( $g kg^{-1}$ ). A temperatura mínima do ar a 2 metros foi uma variável de superfície, enquanto que as demais variáveis foram utilizadas em cinco níveis de pressão (1000, 850, 700, 500 e 200 hPa).



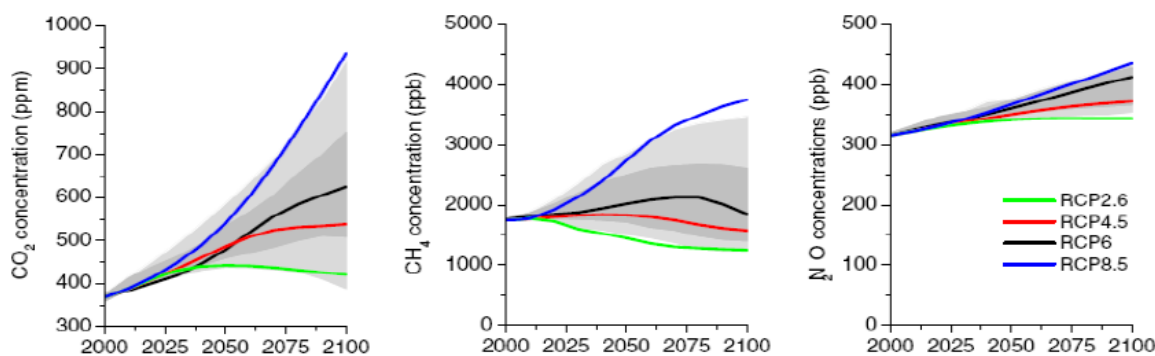


Figura 2.2 Emissão de gases de efeito estufa dos cenários RCP. Fonte: Wayne (2013).

### 2.2.3. Dados do CRU

O sistema CRU é um conjunto de análise desenvolvido na *University of East Anglia, Norwich* – Reino Unido (Mitchell e Jones, 2005), por meio da interpolação de dados observados de estações meteorológicas ao redor do mundo para uma grade horizontal de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  de latitude e longitude para o período de dados mensais de 1901 – 2009. Esses dados têm sido muito usados na validação da climatologia sazonal dos modelos climáticos regionais na América do Sul (Llopart, 2014; Reboita *et al.*, 2014; da Rocha *et al.*, 2014 e Bazo, 2014). A variável do CRU usada neste projeto foi temperatura mínima mensal para o período 1971 – 2005.

### 2.2.4. Dados de reanálise

Para corrigir a temperatura mínima simulada, por meio da regressão múltipla linear, assim como para descrever os padrões sinóticos com ocorrência de geada, foram utilizadas as variáveis da reanálise Era-Interim do ECMWF (Dee *et al.*, 2011): temperatura mínima do ar a 2 metros ( $^\circ\text{C}$ ), temperatura do ar ( $^\circ\text{C}$ ), componentes U e V do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), velocidade vertical ômega ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em cinco níveis de pressão (1000, 850, 700, 500 e 200 hPa).

Adicionalmente, utilizou-se o dado de satélite de radiação de onda longa ( $\text{Wm}^{-2}$ ) *Outgoing Longwave Radiation* (OLR) do *Earth System Research Laboratory* da NOAA, com o fim de complementar o entendimento dos padrões sinóticos durante as geadas. Esses dados têm uma resolução espacial de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  de latitude por longitude. Para ambos dados, foi considerado o período 1979 – 2005.

## 2.3 Tratamento dos dados

### 2.3.1. Diagrama de Taylor

Como primeiro passo para o clima presente (1971 - 2005), foram avaliados os dados de temperatura mínima diária das simulações, das estações meteorológicas e do CRU mediante o cálculo dos ciclos anuais de cada série de dados. A avaliação consistiu na comparação das estatísticas (desvio padrão, coeficiente de correlação e a raiz quadrada do erro médio quadrático) de cada ciclo anual usando o diagrama de Taylor.

O diagrama de Taylor (Taylor, 2001) permite que um ou vários conjunto de dados modelados (séries das simulações ou dados do CRU) sejam comparados a uma referência (dados observados das estações meteorológicas), resumindo seus parâmetros estatísticos por pontos num diagrama bidimensional. Assim, o conjunto de dados modelados cujo ponto estiver mais próximo ao ponto de referência é considerado o conjunto com maior grau de similaridade à referência.

A Figura 2.3 mostra um exemplo do diagrama de Taylor, onde as linhas de cor azul indicam a correlação, os círculos verdes indicam a raiz quadrada do erro médio quadrático (*Root Mean Square* - RMS) e o desvio padrão é proporcional à distância radial desde a origem. Os pontos vermelhos representam os dados modelados e quanto mais próximos estiverem do ponto “*observed*” no eixo X indicarão uma alta correlação, desvio padrão similar ao observado e menor RMS. O diagrama também pode representar correlações negativas, completando o semicírculo para a esquerda.

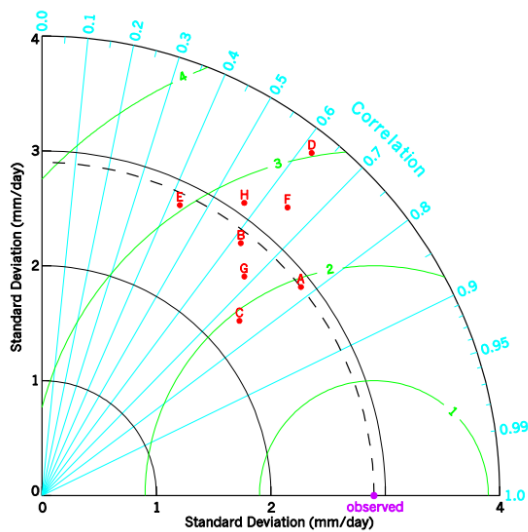


Figura 2.3 Exemplo do diagrama de Taylor. Adaptado de Taylor (2005).

No diagrama, o parâmetro estatístico de correlação corresponde à **correlação de Pearson** que mede o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias quantitativas e não depende das unidades de medida. Pode ser calculada da seguinte forma:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \dots (1)$$

O valor de  $r_{xy}$  varia no intervalo de -1 a 1. Os valores positivos de  $r_{xy}$  mostram uma relação direta entre as variáveis, é dizer as duas aumentam ou diminuem ao mesmo tempo; enquanto que valores negativos de  $r_{xy}$  representam uma relação inversa, uma das variáveis aumenta quando a outra diminui. Os valores de -1 e 1 indicam uma relação linear perfeita e um valor de 0 indica que não existe uma relação linear entre as variáveis.

A **raiz quadrada do erro médio quadrático** o RMS é definida como a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados da diferença entre duas variáveis, ou seja; o valor do RMS é sensível aos erros associados a valores extremos da série de dados.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \dots (2)$$

O **desvio padrão** é uma medida de dispersão estatística em relação à média. Um baixo valor do desvio padrão indica que os dados estão próximos da média, enquanto que um desvio padrão alto indica que os dados estão dispersos da média.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \dots (3)$$

De forma complementar, foi calculado o **bias** ou erro médio. O bias é a diferença da média de dois conjuntos de dados, indicando se um deles superestima ou subestima o outro valor e é calculado como:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)}{N} \dots (4)$$

Os valores de bias mais próximos de zero representam menores erros sistemáticos.

### 2.3.2. Perfect Prog

Para os dados simulados, aplicou-se o método estatístico “*perfect prog*” (Klein *et al.*, 1959) ou correção estatística das simulações. O *perfect prog* consiste em obter uma relação linear entre o preditando e os preditores utilizando apenas observações, e aplicar essa relação para os dados simulados (Marzban *et al.*, 2006). A escolha dos preditores é de muita importância quando se desenvolve este método, pois eles serão as variáveis que explicarão o comportamento do preditando. Um requerimento básico para o preditor é o alto poder preditivo, o qual pode ser identificado através de análise estatística de correlação entre preditor e preditando (Maraun *et al.*, 2010).

Segundo Marzban *et al.* (2006), o *perfect prog* pode ser representado pelas seguintes equações:

$$\text{Perfect Prog: } \begin{cases} y_o = f[x_o] + \text{erro}, \dots (5) \\ y_f = f[x_m] \dots (6) \end{cases}$$

Onde:

$x_o$  : preditor observado

$x_m$  : preditor modelado

$y_o$  : preditando observado

$y_f$  : preditando modelado

No presente trabalho, empregaram-se os dados das estações meteorológicas como preditando observado e os dados da reanálise Era-Interim como preditores observados. Assim a regressão linear múltipla foi desenvolvida com o objetivo de obter equações que explicassem a relação entre preditor e preditando. A regressão foi feita para cada ponto de estação usando 60% dos dados do período da climatologia do presente (1971 – 1992), e validada com o restante do período (1993 – 2005).

Tabela 2.3 Preditores e preditandos considerados no *perfect prog.* (\* indica variável de superfície).

		Variável	Nível de pressão	Horário	Período
<b>Observados</b>	Preditando (estações meteorológicas)	Temperatura mínima	Superfície	-	1971 - 2005
	Preditores (Era-Interim)	Temperatura mínima 2 m*; U, V; Ômega; Umidade específica	500 hPa	00 UTC	1971 - 2005
<b>Modelados/ simulados</b>	Preditando (cada simulação)	$T_R$	Superfície	-	1971 – 2005 2060 – 2090
	Preditores (cada simulação)	Temperatura mínima 2 m*; U, V; Ômega; Umidade específica	500 hPa	00 UTC	1971 – 2005 2060 – 2090

Os coeficientes da equação obtida foram aplicados aos preditores simulados para obter o preditando simulado (temperatura mínima simulada e reconstruída -  $T_R$ ), tanto para o

período presente (1971 – 2005) como para o futuro (2060 – 2090). Desta forma, utilizou-se a  $T_R$  para a análise de geadas nas simulações. A Tabela 2.3 mostra os dados que foram considerados como preditores e preditandos observados e simulados no *perfect prog*. As variáveis preditores foram selecionadas considerando os trabalhos de FAO e SENAMHI (2010), Comunidad Andina (2009) onde descrevem as características das geadas na parte peruana da CA.

### **2.3.3. Identificação de geadas**

A terceira parte do trabalho consistiu em identificar os eventos de geadas, tanto nos dados observados como nas simulações. Para ambos dados, utilizou-se a seguinte definição: os eventos de geadas acontecem quando a temperatura mínima atinge valores menores ou iguais a 0°C. Esse conceito foi proposto por o *World Meteorological Organization* (WMO, 1992) e adotado em vários estudos a nível mundial, como nos trabalhos de Comunidad Andina (2009), FAO e SENAMHI (2010), Anandhi *et al.* (2013) e Rahimi (2011). Apenas para a situação da Austrália, utilizou-se o critério da temperatura mínima do ar igual ou menor a 2,2°C (na altura de 1,2 metros) para identificar uma geada, uma vez que tais estudos estavam dirigidos para os impactos de geadas na agricultura (Barlloow *et al.*, 2015).

Uma vez identificados os dias com casos de geadas, calculou-se a frequência mensal destes eventos para todos os anos do clima presente (1971 – 2005) para os dados observados e simulados. Com isso, obteve-se o ciclo anual da frequência de geadas observadas e para cada simulação. Da mesma forma, calcularam-se os ciclos anuais da frequência de geadas para cada simulação para o futuro (2060 – 2090), com o objetivo de se conhecer suas tendências.

### **2.3.4. Análise de Composições**

O método de composições consiste no cálculo da média dos eventos a serem estudados, portanto descrevem as características médias do evento. Para evidenciar padrões

sinóticos predominantes, calcularam-se as anomalias das composições como a diferença entre as composições para os eventos de geadas e a climatologia.

Numa primeira parte, esse método foi utilizado com a finalidade de descrever os padrões sinóticos predominantes na ocorrência de geadas. Para isso, foram necessárias as datas de ocorrência de geadas nos dados das estações meteorológicas e as variáveis da reanálise Era-Interim; assim como o dado de OLR. O horário predileto para analisar as geadas seria às 06:00 UTC (01:00 – hora local) já que o período de maior ocorrência é na madrugada ou ao nascer do sol (Comunidad Andina, 2009), mas as composições foram calculadas para a estação do inverno às 00:00 UTC (7:00pm – hora local) devido que neste horário a Era-Interim é composto por maiores dados de observações das variáveis meteorológicas.

Numa segunda parte, com o propósito de conhecer as condições meteorológicas que as simulações apresentam nos eventos de geadas, foram também determinadas as anomalias das composições para as simulações utilizando as mesmas variáveis meteorológicas e as datas de ocorrência de geadas nas simulações, considerando a  $T_R$  como variável para identificá-las. Nesse caso, as composições foram feitas para o período presente e futuro permitindo assim conhecer as possíveis mudanças nos padrões sinóticos associados às geadas.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Perfect Prog

A aplicação do *perfect prog* incluiu três partes: a análise dos dados simulados antes de aplicar o método, através da comparação do ciclo anual observado e simulado, obtenção das equações com regressão linear múltipla dos dados do Era-Interim e a análise do ciclo anual dos dados simulados depois de aplicar a técnica do *perfect prog*.

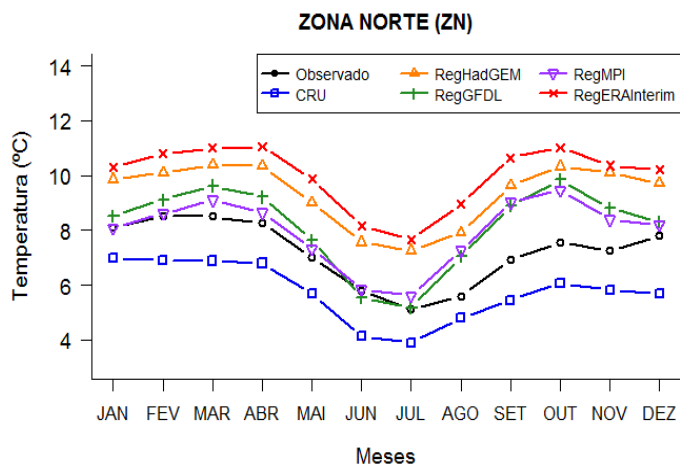
#### 3.1.1. Análise do ciclo anual da temperatura mínima antes do *perfect prog*

Neste item, foram comparados os ciclos anuais observados com os ciclos anuais calculados a partir dos dados simulados antes de aplicar o *perfect prog*, permitindo desta forma, conhecer o comportamento inicial das simulações com respeito à temperatura mínima do ar. Na Figura 3.1, mostram-se o ciclo anual da temperatura mínima e o correspondente diagrama de Taylor para a zona norte (ZN). O ciclo anual observado da temperatura mínima para a ZN está definido com valores máximos no intervalo de 8°C – 9°C nos meses de verão e valores mínimos entre 5°C – 6°C nos meses de inverno. Observa-se que os dados do CRU apresentam valores inferiores, subestimando a temperatura mínima em aproximadamente 1,5°C ao longo do ano (Tabela 3.1); mesmo assim são os dados com maior correlação (0,95) e menor RMS para o ciclo anual (Figura 3.1b).

No caso das simulações, o RegHadGEM e o RegERAInterim apresentam maior correlação, menor RMS e desvio padrão similar ao observado para o ciclo anual (Figura 3.1b); mas superestimam os valores de temperatura mínima no intervalo de 2°C – 3°C, com bias máximos nas estações de inverno e primavera (Tabela 3.1). Já as simulações RegGFDL e RegMPI têm um bias quente menor, entre 0°C – 1°C, chegando quase a 2°C na estação de primavera (Tabela 3.1); no entanto as correlações são um pouco menor (mas ainda altas entre 0,8 a 0,87) e o RMS, junto com o desvio padrão, são maiores comparados com as outras simulações.



a)



b)

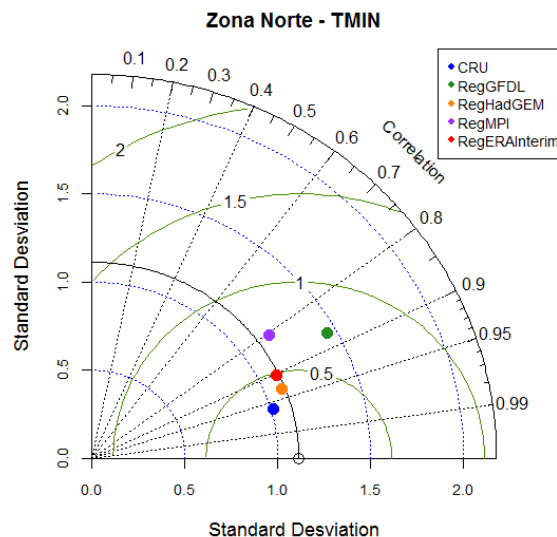


Figura 3.1(a) Ciclo anual da temperatura mínima para a zona norte (ZN) e (b) diagrama de Taylor correspondente. Período 1971 – 2005.

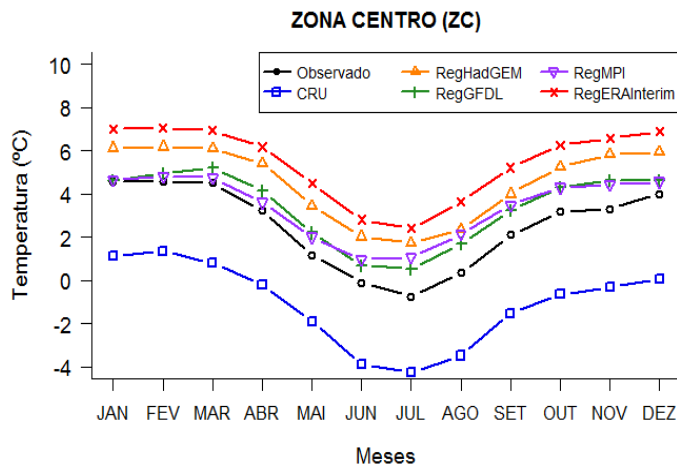
Tabela 3.1 BIAS sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona norte (ZN).

		DJF	MAM	JJA	SON
OBS	Média	8.09	7.91	5.47	7.27
CRU	BIAS	-1.57	-1.46	-1.20	-1.48
RegHadGEM	BIAS (OBS)	1.80	2.00	2.11	2.75
	BIAS (CRU)	3.37	3.46	3.30	4.24
RegGFDL	BIAS (OBS)	0.54	0.90	0.46	1.92
	BIAS (CRU)	2.10	2.36	1.66	3.40
RegMPI	BIAS (OBS)	0.19	0.44	0.75	1.69
	BIAS (CRU)	1.76	1.90	1.95	3.17
RegERAInterim	BIAS (OBS)	2.11	2.61	2.69	3.24
	BIAS (CRU)	3.70	4.02	3.84	4.75

Para a zona centro (ZC), a Figura 3.2 mostra o ciclo anual da temperatura mínima e o respectivo diagrama de Taylor. A temperatura mínima observada na ZC apresenta dois picos de valores máximos: janeiro a março (4°C – 5°C) e outubro a dezembro (3°C – 4°C), e valores mínimos nos meses de inverno entre -1°C – 0°C. Os dados do CRU novamente apresentam valores de temperatura mínima inferiores aos dados observados, subestimando-a em 3,5°C em

média ao longo do ano (Tabela 3.2). No entanto, o CRU apresenta desvio padrão similar ao observado, um RMS pequeno e correlação alta de 0,99 (Figura 3.2b).

a)



b)

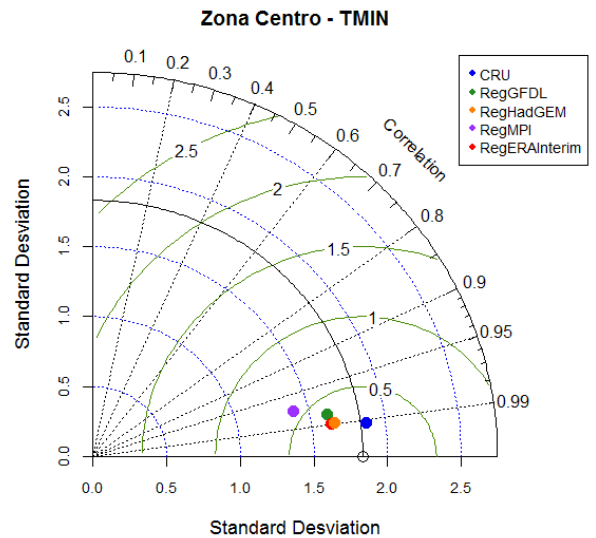


Figura 3.2(a) Ciclo anual da temperatura mínima para a zona centro (ZC) e (b) diagrama de Taylor correspondente. Período 1971 – 2005.

Todas as simulações apresentam baixos valores de RMS e alta correlação para o ciclo anual, ou seja, acima de 0,95. Com relação ao bias, nas simulações RegGFDL e RegMPI o erro médio quente é muito menor que nas outras (0°C – 1°C) para todo o ano com máximos nos meses de inverno e primavera (Tabela 3.2).

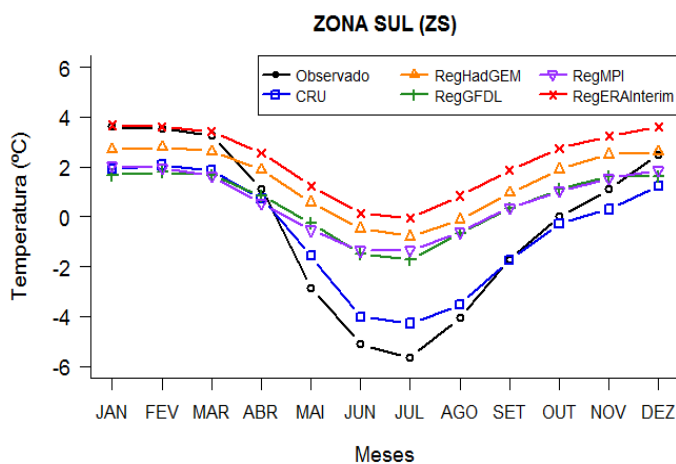
Tabela 3.2 Bias sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona centro (ZC).

		DJF	MAM	JJA	SON
OBS	Média	4.25	2.86	-0.18	2.81
CRU	BIAS	-3.40	-3.30	-3.70	-3.65
RegHadGEM	BIAS (OBS)	1.83	2.10	2.22	2.19
	BIAS (CRU)	5.24	5.40	5.92	5.84
RegGFDL	BIAS (OBS)	0.47	0.98	1.16	1.25
	BIAS (CRU)	3.87	4.28	4.86	4.90
RegMPI	BIAS (OBS)	0.43	0.59	1.56	1.26
	BIAS (CRU)	3.83	3.89	5.26	4.91
RegERAInterim	BIAS (OBS)	2.54	2.85	3.04	3.08
	BIAS (CRU)	4.01	4.09	4.29	4.46

A Figura 3.3 mostra o ciclo anual da temperatura mínima e diagrama de Taylor para a zona sul (ZS). A ZS tem uma amplitude térmica muito maior que as outras zonas de análise, apresentando os valores máximos nos meses de verão, que chegam até 5°C, e mínimos de -5°C nos meses de inverno. Nesta zona, os dados do CRU subestimam a temperatura mínima de novembro até março e superestimam os valores de maio até agosto (Tabela 3.3); e é o conjunto de dados que mais se aproxima aos dados observados com desvio padrão similar e menor RMS.

Na ZS, as simulações apresentam alta correlação para o ciclo anual acima de 0,95; mas os modelos não conseguem representar a amplitude térmica anual observada, o que implica em altos valores de RMS e menores desvios padrões do que os presentes nas observações (Figura 3.3b).

a)



b)

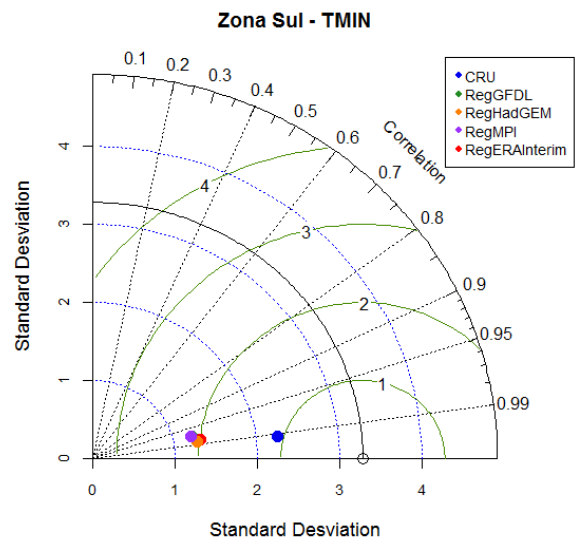


Figura 3.3(a) Ciclo anual da temperatura mínima e (b) seu diagrama de Taylor para a zona sul (ZS).

A simulação RegERAInterim na ZS é a única com bias quente em todas as estações do ano, enquanto que as outras apresentam um bias frio nos meses de verão (DJF) e bias quente no restante do ano. Mais uma vez, o RegGFDL e o RegMPI têm bias quente menor que as outras simulações com valores máximos nos meses de inverno (Tabela 3.3).

Vale distinguir que a ZN tem o máximo do bias quente nos meses da primavera (SON), enquanto que na ZC o bias quente máximo ocorre nos meses de inverno (JJA) e primavera, e na ZS só nos meses de inverno. Além disso, o bias das simulações são menores quando comparados com as observações do que com o dado do CRU, com algumas exceções nas estações de verão e inverno da ZS.

Tabela 3.3 Bias sazonal da temperatura mínima de cada simulação para a zona sul (ZS).

		DJF	MAM	JJA	SON
OBS	Média	3.22	0.46	-4.95	-0.22
CRU	BIAS	-1.48	-0.12	1.02	-0.36
RegHadGEM	BIAS (OBS)	-0.53	1.23	4.49	1.98
	BIAS (CRU)	0.95	1.34	3.47	2.34
RegGFDL	BIAS (OBS)	-1.53	0.29	3.67	1.23
	BIAS (CRU)	-0.05	0.40	2.65	1.59
RegMPI	BIAS (OBS)	-1.27	0.09	3.84	1.20
	BIAS (CRU)	0.21	0.20	2.82	1.56
RegERAInterim	BIAS (OBS)	0.41	1.93	5.18	2.77
	BIAS (CRU)	1.89	1.98	4.21	3.25

Segundo os ciclos anuais da temperatura mínima do ar nas três zonas de análise (Figuras 3.1 a 3.3), os meses de inverno (JJA) apresentam os valores mínimos e, portanto, têm maior potencial de frequência de geadas (INDECI, 2008). É assim, que na Figura 3.4 mostram-se as distribuições espaciais das temperaturas mínimas no inverno dos dados observados, dados do CRU e das simulações. Nota-se, segundo a escala de cores, os diferentes intervalos de temperatura mínima para cada zona de análise nos dados observados (Figura 3.4a). Os dados do CRU estão próximos das temperaturas observadas e reproduzem os núcleos mais negativos da ZC e ZS; situação que as simulações também fazem, mas com menor intensidade. Em cada mapa, torna-se claro o efeito termorregulador do LT com as temperaturas mínimas ligeiramente mais altas do que nas vizinhanças. O mapa dos dados observados (Figura 3.4a) considerou a influencia da latitude, longitude e topografia para representar a temperatura mínima.

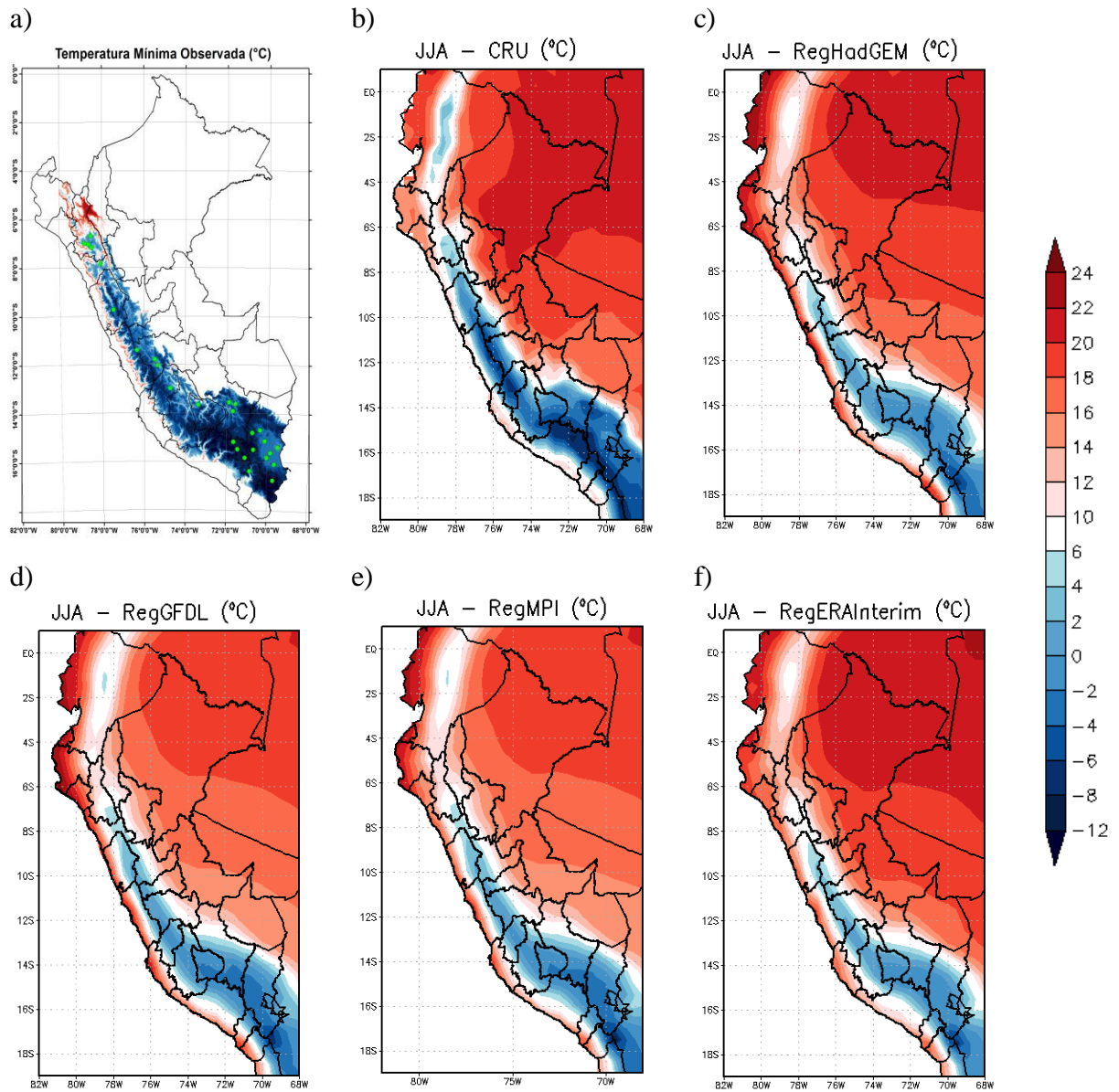


Figura 3.4 Distribuição espacial da temperatura mínima média do inverno para o período 1971 – 2005 para os dados observados com as estações meteorológicas (pontos verdes) (a), dados do CRU (b) e simulações (c, d, e, f).

### 3.1.2. Regressão Linear Múltipla

Nesta secção, são apresentadas as equações das regressões lineares múltiplas obtidas a partir dos dados observados (preditandos) e dados do Era-Interim (preditores) no período 1972 – 1992 e a respectiva avaliação com os dados observados. Essas equações serão utilizadas na aplicação do *perfect prog* nos dados simulados. As regressões foram construídas com os dados do Era-Interim com a finalidade de se aproximar ao comportamento observado.

São apresentadas as equações de três estações meteorológicas: Granja Porcon (ZN), Huayao (ZC) e Puno (ZS) e respectivos  $R^2$  das regressões lineares (Tabela 3.4). As equações de regressão linear múltipla das demais estações meteorológicas são mostradas no Apêndice A.

As variáveis das equações são as seguintes:

t: Temperatura mínima observada na estação meteorológica.

tmn: Temperatura mínima a 2 m de altura da Era-Interim.

q: Umidade específica da Era-Interim.

w: velocidade vertical ômega da Era-Interim.

u , v: Componentes zonal e meridional do vento em 500hPa, respectivamente.

Os  $R^2$  das regressões estão no intervalo de 0,54 – 0,85 para todas as estações meteorológicas (Apêndice A). Para cada equação aplicou-se um teste estatístico de Fisher (F-test) com nível de significância de 0,05, e obtiveram-se valores de P (p-value) menores que 0,01. Esses resultados mostram evidências contra a hipótese nula dos coeficientes das equações (Suárez, 2012).

Tabela 3.4 Equações da regressão linear múltipla para três estações meteorológicas

Estação (Zona)	Equação	$R^2$ Múltiplo
Granja Porcon (ZN)	$t=0,25*tmn+1166,90*q - 7,65*w - 0,77*u+0,13*v - 11,48$	0,64
Huayao (ZC)	$t=0,44*tmn+1021,42*q+6,34*w - 0,07*u - 0,31*v - 5,64$	0,72
Puno (ZS)	$t=0,42*tmn+1174,72*q - 4,04*w+0,18*u+0,29*v - 5,79$	0,85

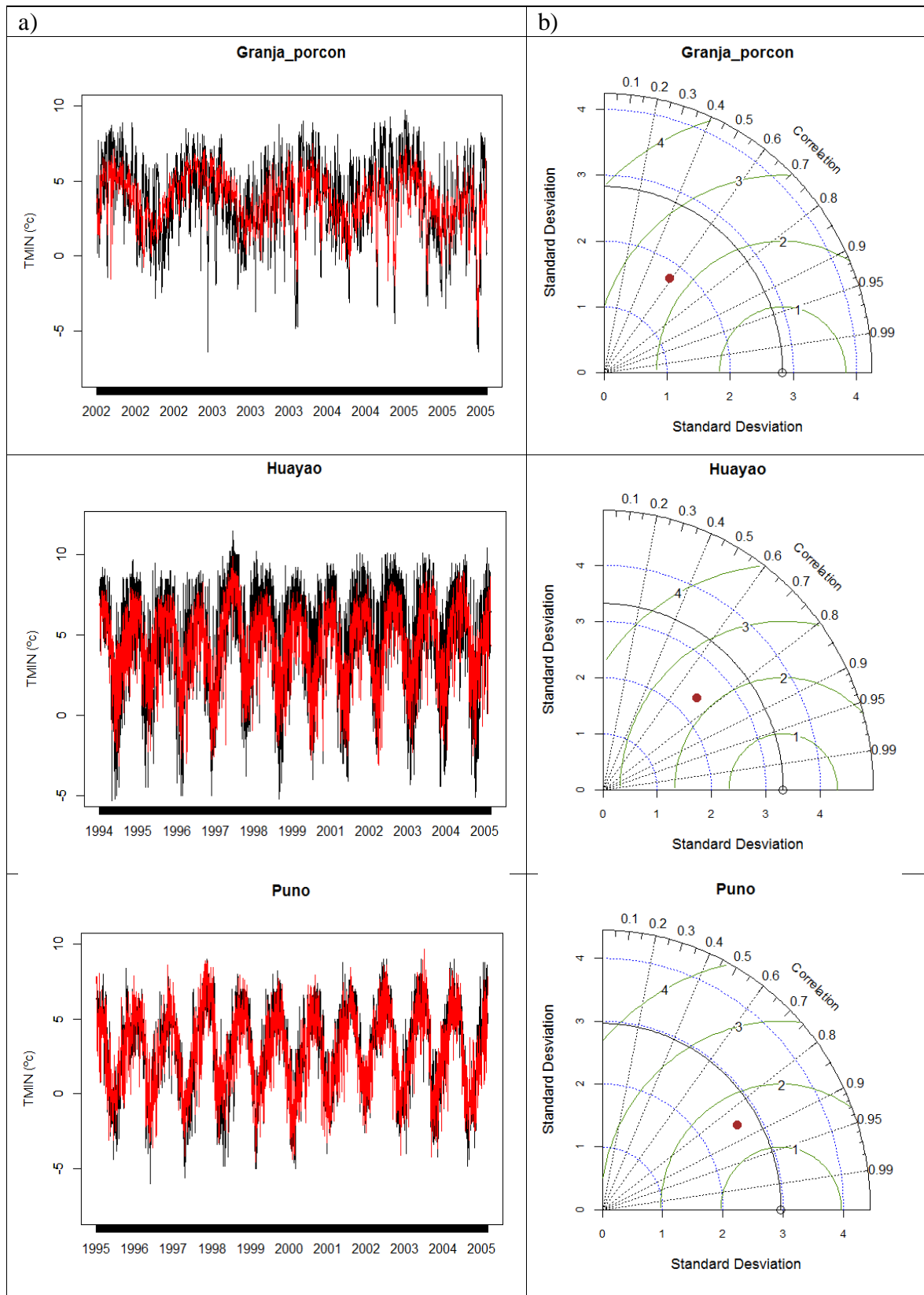


Figura 3.5 (a) Série temporal da temperatura mínima observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação meteorológica. (b) Diagramas de Taylor de cada regressão linear múltipla.

Depois de obter as equações para cada estação meteorológica, a aplicação das mesmas foi avaliada com os 40% restantes dos dados observados. A Figura 3.5 mostra a série temporal observada (linha preta) e a série reconstruída com as equações das regressões (linha vermelha) de cada estação meteorológica da Tabela 3.4. As equações das séries temporais das demais estações meteorológicas são mostradas no Apêndice B. Nota-se na Figura 3.5 um ajuste considerável do ciclo anual da série reconstruída com a observada. Os diagramas de Taylor de cada estação indicam que as séries reconstruídas apresentam alta correlação com a série observada (entre 0,60 – 0,85), indicando que as equações podem ser usadas para reduzir os erros da temperatura mínima simulada. A menor variabilidade e os valores relativamente altos de RMS das séries reconstruídas resultam da dificuldade em reconstruir os valores extremos das séries observadas (Figura 3.5a-b).

As regressões foram aplicadas nos dados simulados considerando os coeficientes das equações obtidas para cada estação meteorológica. Nesse caso, as variáveis independentes das equações (preditores) foram retiradas das simulações e os predictandos resultantes denominados de temperatura mínima simulada e reconstruída ( $T_R$ ).

### **3.1.3. Análise do ciclo anual da temperatura mínima depois do *perfect prog***

A comparação do ciclo anual observado com o ciclo anual das simulações calculado com dados da  $T_R$  é necessária para conhecer o grau de melhora na temperatura mínima simulada que se obteve ao aplicar a técnica do *perfect prog*. A Figura 3.6 mostra os ciclos anuais simulados com a  $T_R$ .

Para a ZN, a aplicação do *perfect prog* diminuiu o bias quente que apresentavam as simulações RegHadGEM e RegERAInterim e mudou para bias frio as simulações RegGFDL e RegMPI (Figura 3.1a e Figura 3.6a). De acordo com os diagramas de Taylor, o RegGFDL manteve a correlação e RMS e aproximou-se do desvio padrão observado; enquanto que as outras simulações, os valores de correlação e desvio padrão diminuíram (Figura 3.1b e Figura 3.6b). Na ZC, o *perfect prog* diminuiu consideravelmente o bias quente de todas as



simulações (Figura 3.2a e Figura 3.6c) e melhorou as estatísticas (correlação, RMS e desvio padrão) do RegGFDL e RegMPI (Figura 3.2b e Figura 3.6d).

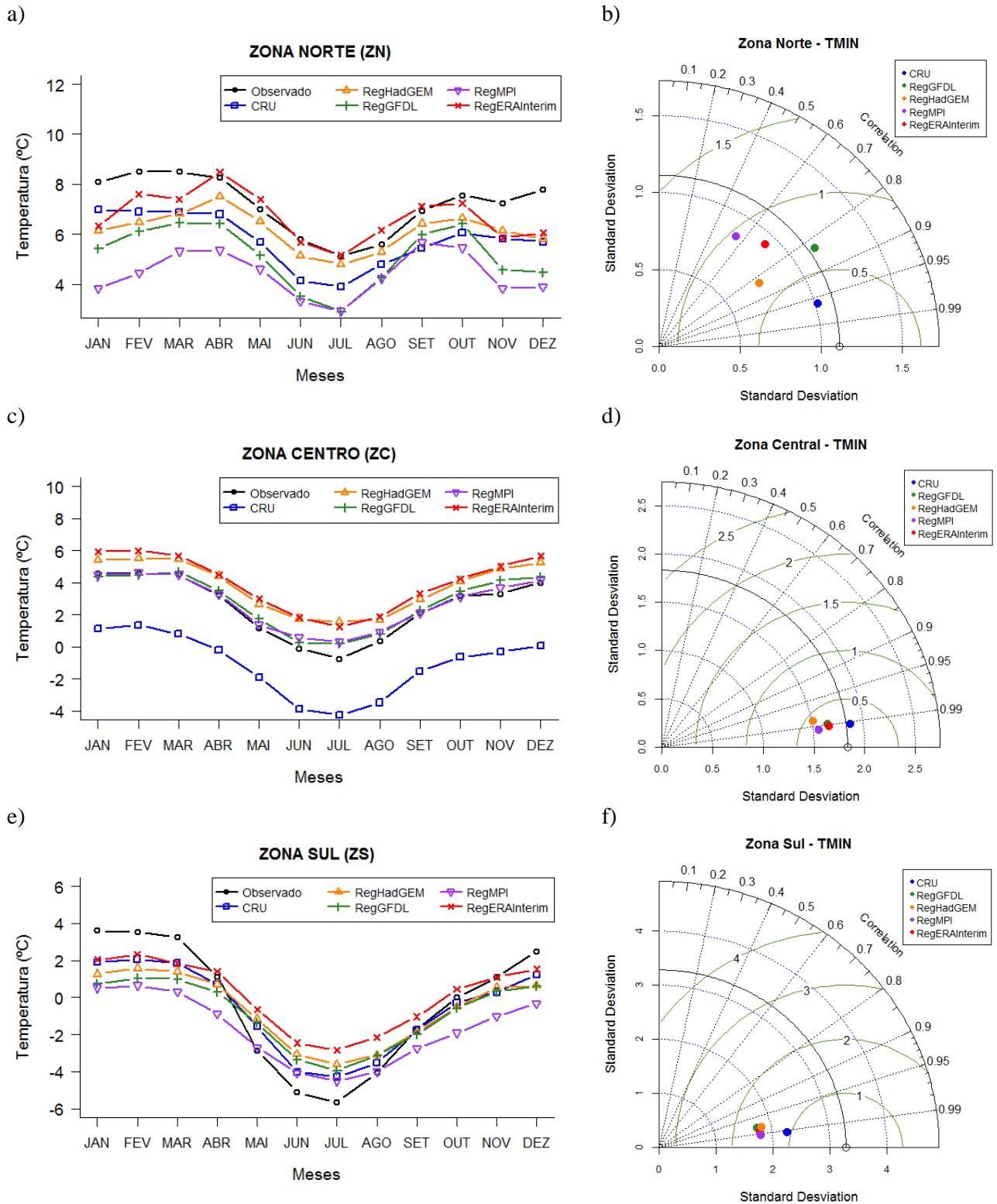


Figura 3.6 Ciclo anual da temperatura mínima observada e  $T_R$  para ZN (a), ZC (c) e ZS (e) e Diagrama de Taylor de cada ciclo anual para ZN (b), ZC (d) e ZS (f). Período 1971 – 2005.

Da mesma forma, o bias quente as simulações para outono, inverno e primavera da ZS diminuíram (Figura 3.3a e Figura 3.6e), apresentando desvios padrões mais similares aos observados e menores valores de RMS quando comparado com o resultado obtido dos dados simulados sem o ajuste linear (*perfect prog*) (Figura 3.3b e Figura 3.6f).

Em resumo, a técnica do *perfect prog* melhorou a representação da temperatura mínima do ar nos dados simulados especialmente nas zonas ZC e ZS. Já para a ZN, o *perfect prog* diminuiu o bias quente de duas simulações RegHadGEM e RegERAInterim, mas reduziu a correlação linear e aumentou o RMS delas, e apenas melhorou as estatísticas do RegGFDL. Mesmo assim, os dados de  $T_R$  foram utilizadas para identificar geadas nas simulações nas três zonas de análise, uma vez que os dados simulados na ZN sem aplicar o *perfect prog* não apresentam ocorrência de geadas (Apêndice C), sendo difícil o estudo desses eventos nessa zona. Além disso, padronizou-se a mesma metodologia para toda a região.

## 3.2 Identificação de geadas

A identificação de geadas foi realizada em duas partes: geadas nos dados observados, conhecendo-se as tendências históricas do clima presente; e geadas nos dados simulados da  $T_R$ . A análise de geadas nas simulações consistiu em calcular o ciclo anual da frequência de geada observada no clima presente e assim, analisar a mudança dos padrões do ciclo anual no futuro.

### 3.2.1. Frequência de geadas nos dados observados

Utilizando o limiar de 0°C para identificar as geadas observadas, foram calculadas as frequências das mesmas para cada zona de análise. Em primeiro lugar, examinou-se o comportamento sazonal das frequências, ou seja, a frequência de geadas para cada estação do ano ao longo do tempo. A Figura 3.7 mostra tendência positiva de geadas em todas as estações do ano para o período 1971 – 2005 na ZN. A menor frequência média de geada foi registrada no outono, com um pico máximo de apenas 3% no ano 1997 (Figura 3.7b). O

inverno apresenta maior frequência de geadas na maior parte dos anos (Figura 3.7c); mas, em alguns anos o número de geadas na primavera é maior que no inverno, como por exemplo, no ano 2000 quando a frequência relativa para toda a série de tempo foi de 13% (Figura 3.7d). Os coeficientes angulares ( $\alpha$ ) indicaram aumento de 1,4% no verão, 0,35% no outono, 3,85% no inverno e 2,8% na primavera para os 35 anos de análise na ZN.

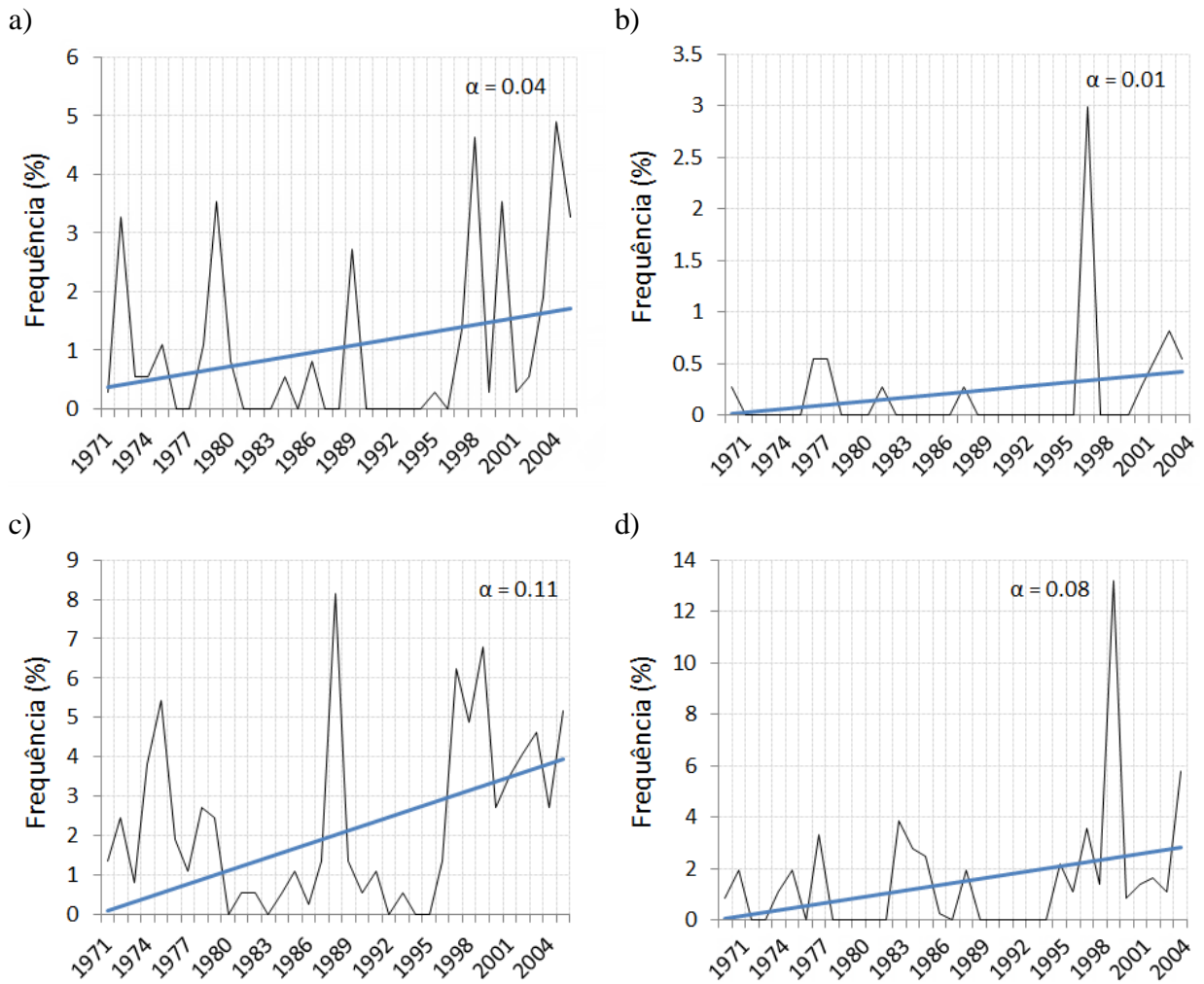


Figura 3.7 Frequência de geada observada para a ZN entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.

A Figura 3.8 mostra as tendências sazonais de geadas para a ZC. Ao contrário da ZN, as tendências de geadas na ZC são negativas com apenas uma tendência ligeiramente positiva no inverno (Figura 3.8c). Os meses de verão apresentam a menor frequência de geadas com um valor máximo de 30% (Figura 3.8a), já os meses de inverno têm a maior frequência atingindo valores de até 66% no trimestre. Os coeficientes angulares ( $\alpha$ ) indicaram

diminuição de 10,9% no verão, 10,5% no outono e 3,2% na primavera para os 35 anos de análise na ZC; enquanto que, o inverno apresentou aumento de 4,2% no período de análise.

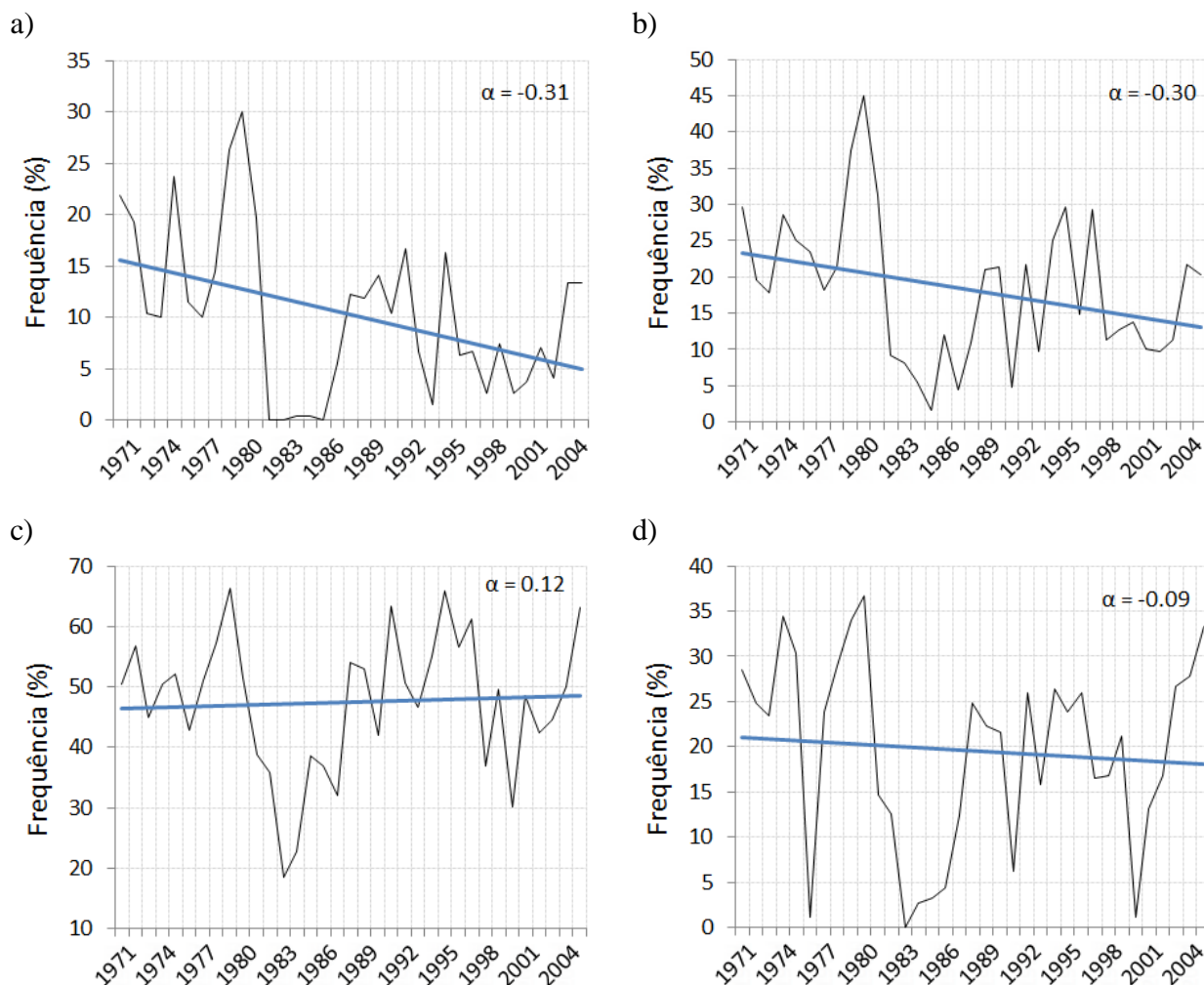


Figura 3.8 Frequência de geada observada para a ZC entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.

As tendências sazonais de geadas para a ZS estão na Figura 3.9. Esta zona não apresenta tendências bem marcadas como na ZC; mostra apenas tendências ligeiramente positivas em todas as estações do ano, com coeficientes angulares máximos no inverno (0,09) e primavera (0,07). A menor e maior frequência de geadas ocorre no verão e inverno, respectivamente. Os coeficientes angulares ( $\alpha$ ) indicaram aumento de 1,4% no verão, 3,2% no inverno e 2,5% na primavera para os 35 anos de análise na ZN.

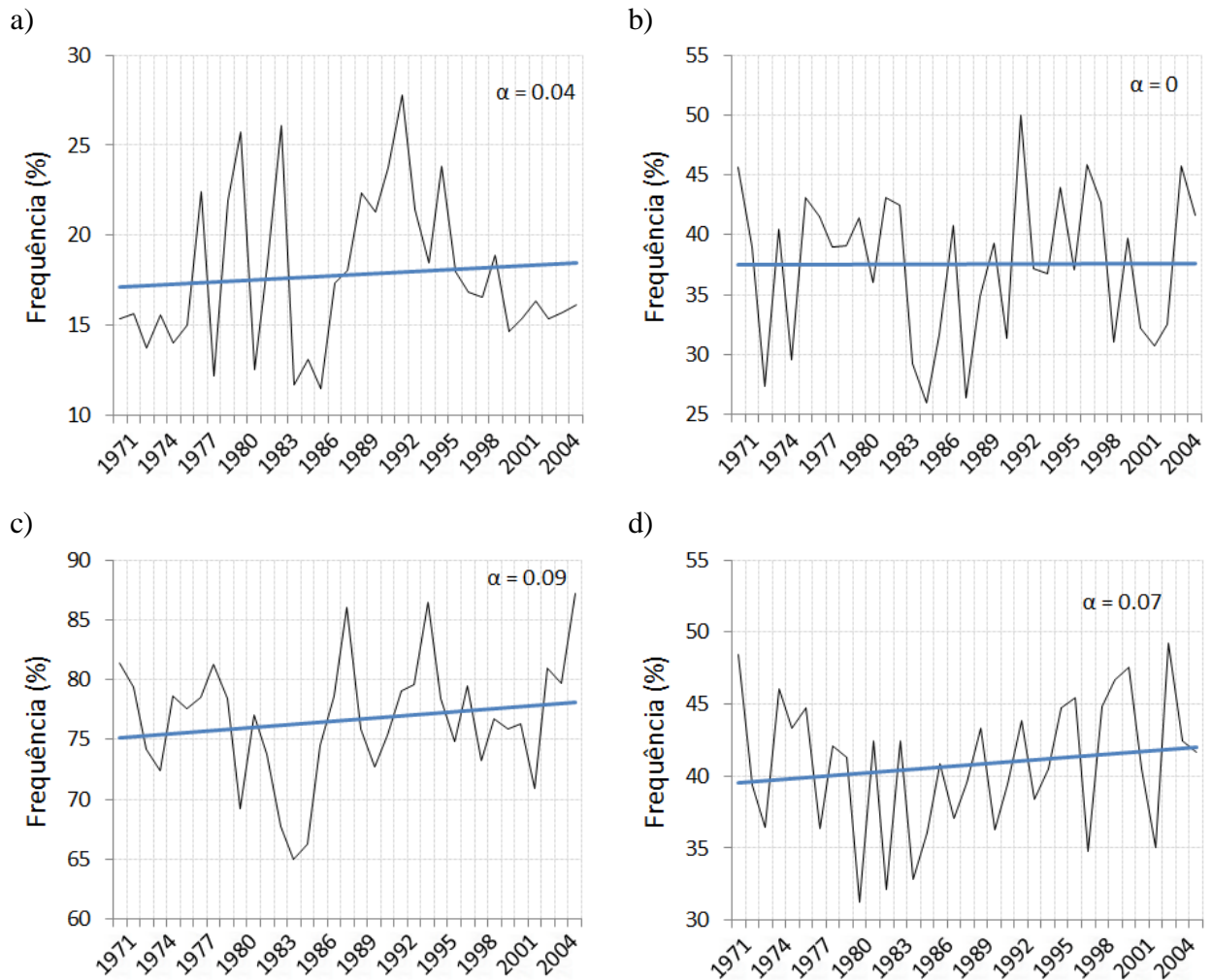


Figura 3.9 Frequência de geada observada para a ZS entre 1971 – 2005. (a) verão – DJF. (b) outono – MAM. (c) inverno – JJA. (d) primavera – SON.

Os resultados das simulações climáticas indicam os padrões médios do clima presente e futuro e não reproduzem a oscilação diária de eventos atmosféricos. É assim, que foi calculado o ciclo anual de frequência de geadas com os dados observados para avaliar as mudanças nas simulações. Os ciclos anuais médios da frequência de geadas para as zonas de análise são mostradas na Figura 3.10. Para a ZC e ZS, os ciclos anuais são representados por uma curva em forma de sino mostrando uma distribuição das geadas com máximos valores de frequências nos meses de inverno (junho, julho e agosto) e mínimos valores em janeiro e fevereiro. Na ZC, a frequência de geadas varia no intervalo de 10% – 60% no ano todo (Figura 3.10b); e na ZS, entre 15% e 86% (Figura 3.10c).

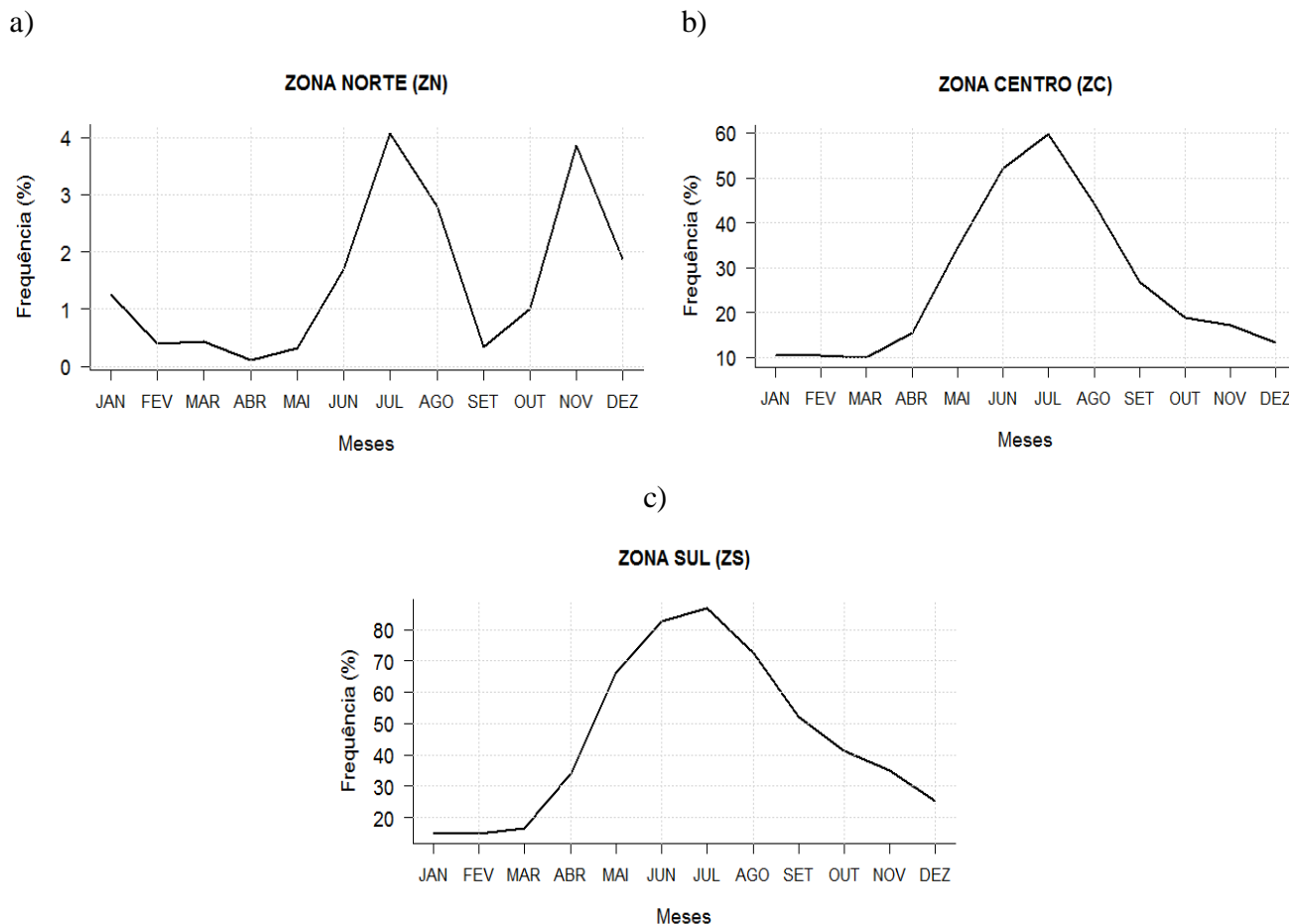


Figura 3.10 Ciclo anual médio da frequência de geadas para o período presente para (a) ZN, (b) ZC e (c) ZS, calculado com dados observados.

Na ZN, o ciclo anual médio é totalmente diferente dos demais (Figura 3.10a). O ciclo anual nesta zona apresenta dois picos máximos de geadas (julho e novembro) e a menor frequência apresenta-se no outono (março, abril e maio). Segundo a literatura (INDECI, 2008; Comunidad Andina, 2009; FAO e SENAMHI, 2010) as geadas ocorrem com maior frequência no inverno, por isso o segundo pico do ciclo anual em novembro na ZN foi considerado atípico. Por esse motivo, calculou-se a frequência de geadas para todos os meses de novembro de todos os anos do período 1971 – 2005 e encontrou-se uma frequência anômala de 30% no ano 2000 (Figura 3.11a). Para conhecer se aquela frequência anômala é gerada por algum erro nos dados das estações meteorológicas da ZN, a Figura 3.11b mostra os dias com geadas por cada estação meteorológica nesta zona. Nesta figura, as quatro estações meteorológicas mostram uma alta frequência de geadas, sendo que aconteceram fortes geadas em toda essa região para o mês de novembro do ano 2000.

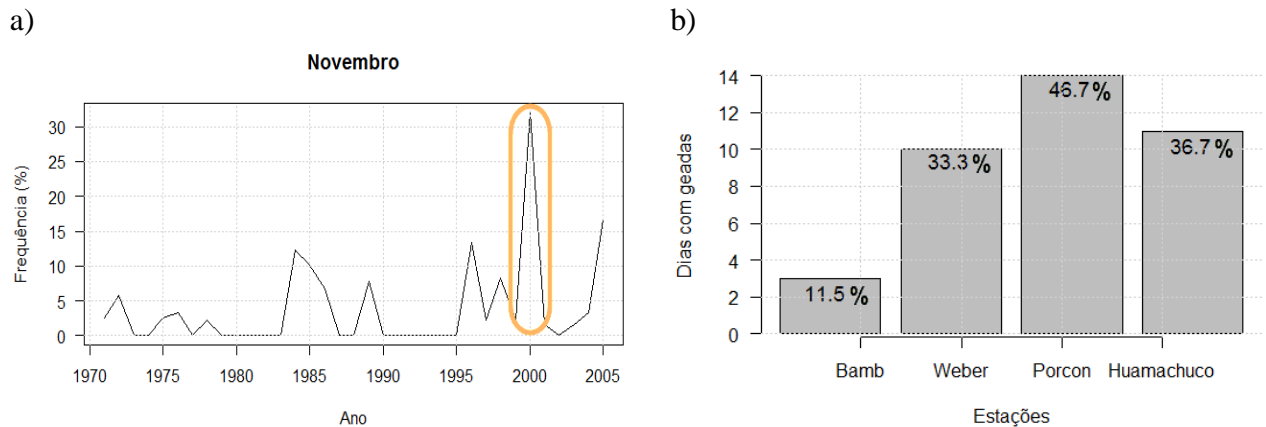


Figura 3.11 (a) Frequência de geada do mês de novembro ao longo do período 1971 – 2005. (b) Dias com geadas no mês de novembro do ano 2000 para as estações meteorológicas da ZN com suas respectivas frequências.

A cada ano, o *National Centers for Environmental Information* da NOAA elabora boletins anuais descrevendo o estado do clima para o ano correspondente. Até o ano 2001 esses boletins tiveram o nome de *Climate Assesment*, mudando depois para o nome de BAMS (*Bulletin of American Meteorological Society*). O *Climate Assesment* 2000 foi utilizado com o fim de encontrar algum fundamento para a ocorrência de grande número de geadas em novembro desse ano. O boletim explica que o episódio frio do Pacífico (La Niña) começou em meados de 1998 e durou até 2000, provocando eventos fortes de precipitação no sudeste da África, regiões centro e norte da Austrália, nordeste do Brasil, Oceano Índico tropical e oeste do Pacífico. Enquanto que as temperaturas nos trópicos foram as mais baixas devido à persistência de dois anos e meio de La Niña, com anomalias de temperatura de até  $-1^{\circ}\text{C}$  na parte este do Oceano Pacífico. Além disso, notou-se um enfraquecimento das condições frias nos meses de junho a setembro e uma re-intensificação entre outubro a dezembro, o que pode estar associado com a alta frequência de geadas na primavera do ano 2000 na ZN.

A Figura 3.12 foi construída com dados de reanálise do Era-Interim. Efetivamente em novembro do ano 2000 a temperatura mínima do ar apresentou anomalia negativa de até  $2^{\circ}\text{C}$  na parte leste do Oceano Pacífico, no litoral do Peru e em toda a CA (Figura 3.12a). Essa diminuição atípica da temperatura mínima em novembro está ligada com um forte núcleo de anomalia negativa da umidade específica do ar de até  $2\text{ g kg}^{-1}$  justamente na parte norte da CA (Figura 3.12b). Desta forma, tanto o BAMS como a ERA-Interim indicam o potencial que se teve em novembro do ano 2000 para a ocorrência de geadas na ZN.

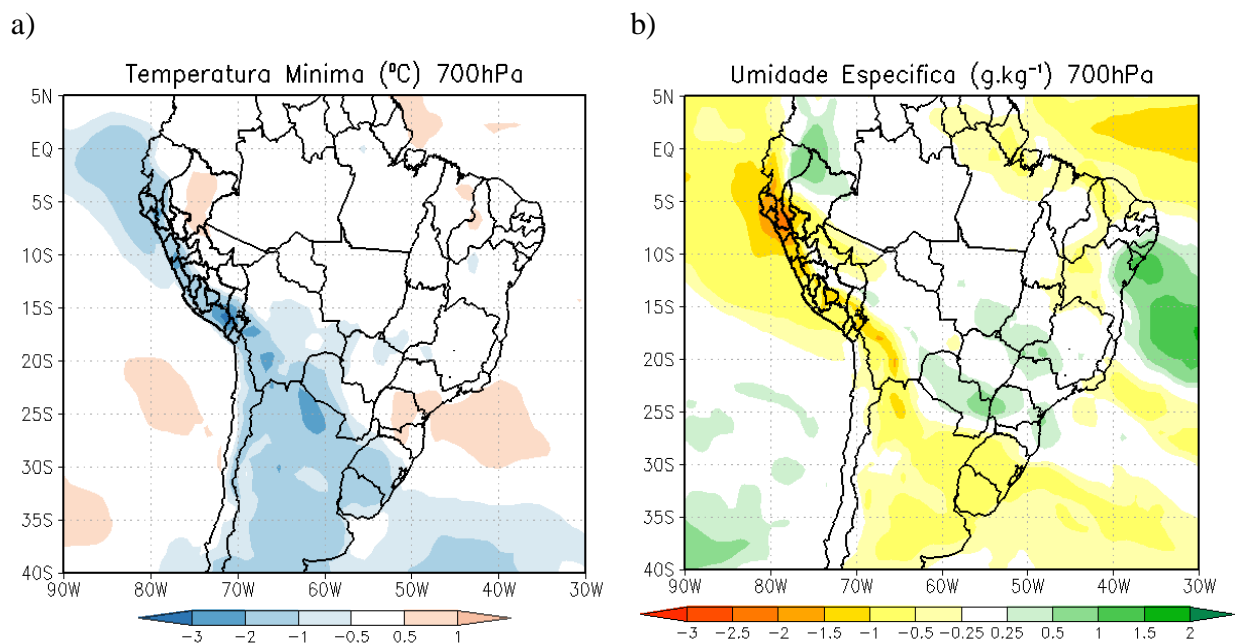


Figura 3.12 Anomalia da (a) temperatura mínima (°C) e (b) umidade específica (g kg<sup>-1</sup>) do ar em 700 hPa para novembro de 2000 em relação aos dados do Era-Interim para o período 1971 – 2005.

### 3.2.2. Geadas nos dados simulados: Mudanças dos padrões de frequência

#### ✓ Clima presente: 1971 – 2005

Uma vez aplicado o método estatístico *perfect prog* nas simulações, foram identificadas a ocorrência de geadas com o limiar 0°C na  $T_R$  (temperatura mínima simulada e reconstruída) para período presente. Foi calculado o ciclo anual da frequência de geadas de cada simulação por zona de análise. No início, trabalhou-se com o período 1971 – 2005 para avaliar a representação do padrão de geadas no clima presente nas simulações.

O ciclo anual da frequência de geadas determinado com os dados observados e simulados para a ZN é apresentado na Figura 3.13a. Pode-se observar que todas as simulações indicam valores maiores de frequências de geadas que os dados observados em todo o ano, e reproduzem os dois picos de máximos valores de geadas nesta zona. As simulações RegMPI e RegGFDL apresentam as maiores correlações com respeito ao ciclo anual observado, mas têm



o desvio padrão, bias e RMS maiores, enquanto que o RegHadGEM e RegERAInterim apresentam desvio padrão mais próximo do ciclo observado, menor bias e RMS, mas a correlação é menor que das outras simulações (Figura 3.13b). Lembre-se que o RegGFDL e RegMPI manifestaram bias frio depois de aplicar o *perfect prog* (Figura 3.6a), o que poderia influenciar no aumento dos valores de frequência de geadas nesta zona. Assim mesmo, a simulação RegGFDL obteve melhores estatísticas depois do *perfect prog* (Figura 3.6b).

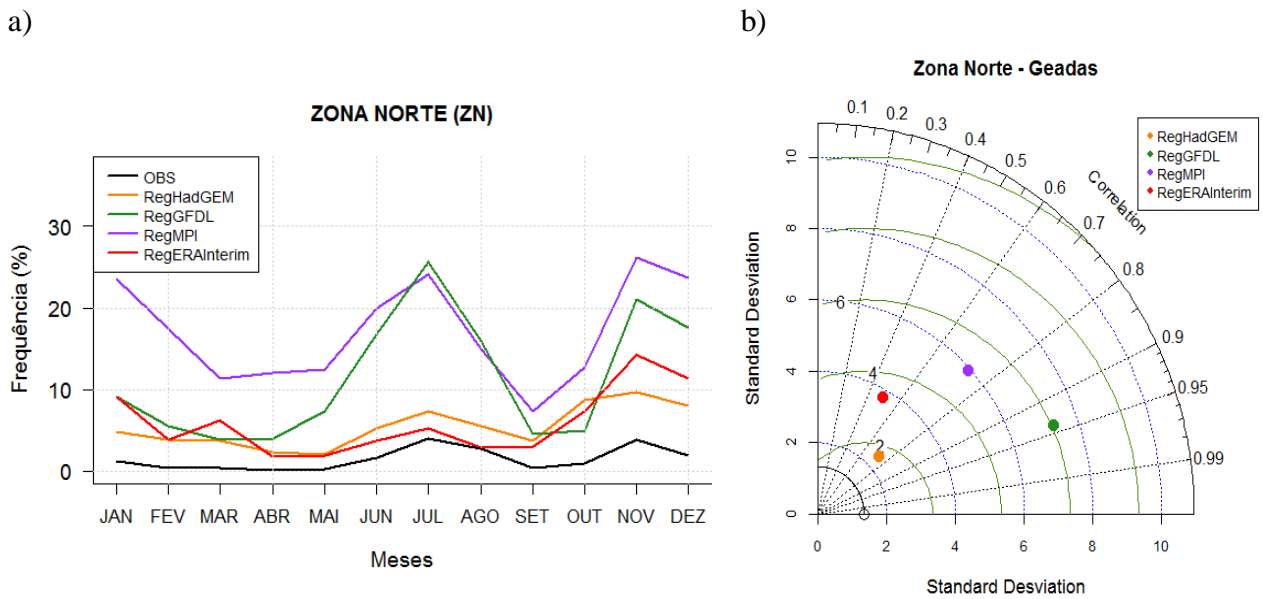
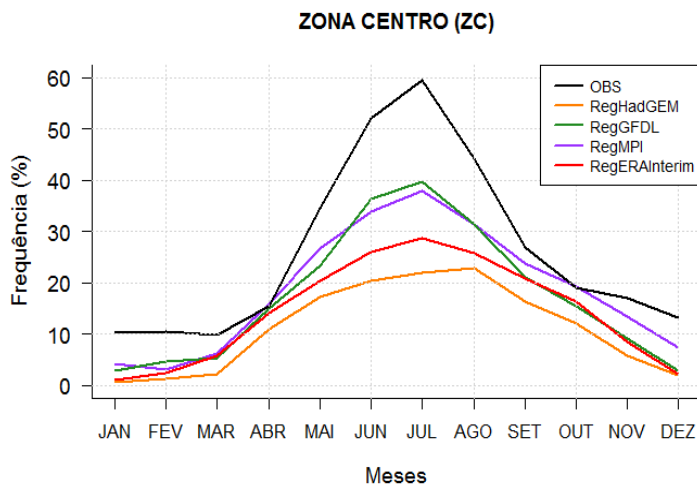


Figura 3.13(a) Ciclo anual médio da frequência de geadas para a ZN para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área

A Figura 3.14a corresponde ao ciclo anual da frequência de geada para dados observados e simulados para a ZC. Todas as simulações reproduzem a curva do ciclo anual de geadas para esta zona com número máximo de geada no inverno e mínimo no verão. No ciclo anual do RegMPI e RegGFDL a frequência de geadas é mais próxima da calculada com os observados, enquanto que as simulações RegHadGEM e RegERAInterim apresentam maior subestimativa das geadas. Situação que é corroborada no diagrama de Taylor (Figura 3.14b), onde o RegMPI e RegGFDL apresentam desvios padrões próximos ao observado e menores RMS que as outras duas simulações. Vale ressaltar que nesta zona, o ciclo anual de todas as simulações tem coeficiente de correlação superior a 0,9, com respeito ao ciclo anual observado. Além disso, o *perfect prog* melhorou o bias e as estatísticas das simulações na representação da temperatura mínima.

a)



b)

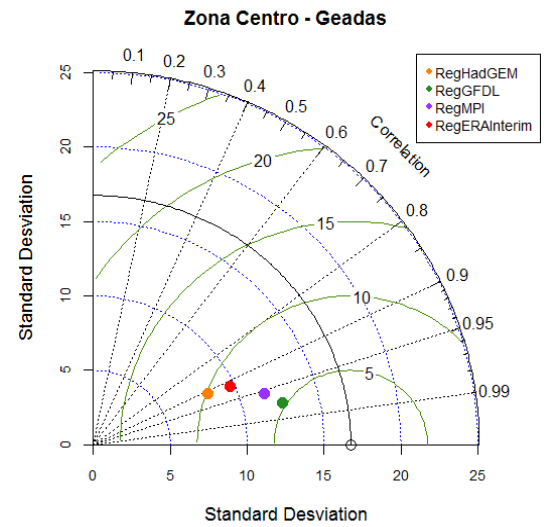
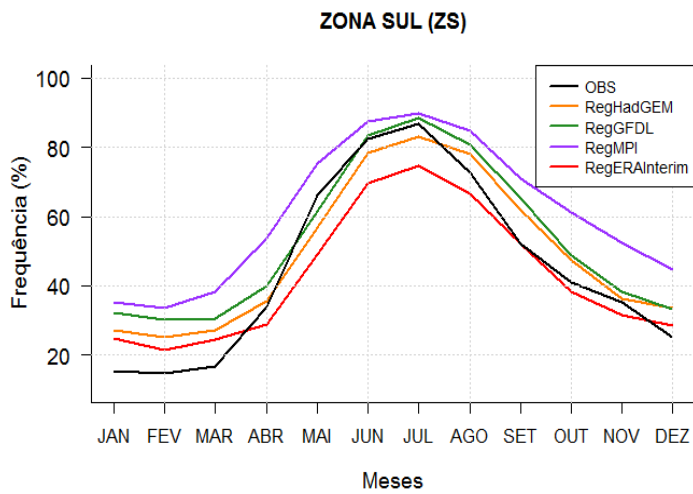


Figura 3.14(a) Ciclo anual médio da frequência de geadas para a ZC para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área.

Para a ZS a Figura 3.15a, apresenta o ciclo anual da frequência de geadas observado e simulado. As quatro simulações reproduzem a curva do ciclo anual, sendo o RegMPI a única simulação que superestima os valores de geadas no ano todo. As demais simulações superestimam as geadas na primavera e verão e subestimam as geadas no inverno. Segundo o diagrama de Taylor (Figura 3.15b), o comportamento dos ciclos anuais de geadas simulados é bastante próximo do ciclo observado. Nesta zona, todos os ciclos anuais simulados têm correlação alta com a observação, acima de 0,95.

a)



b)

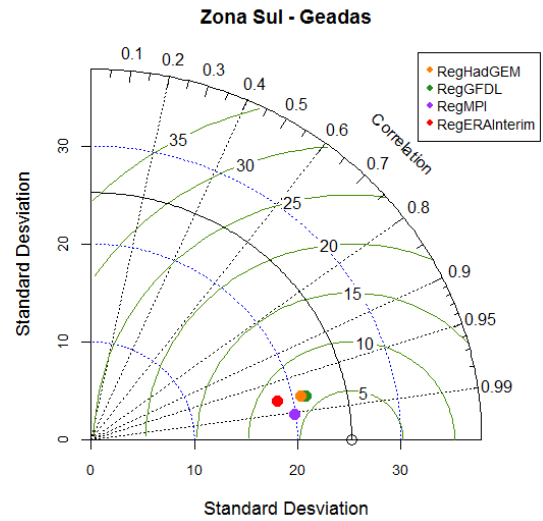


Figura 3.15(a) Ciclo anual da frequência de geadas para a ZS para o período presente, calculados com dados observados e simulados e (b) diagrama de Taylor para a frequência de geadas na mesma área.

✓ **Projeções futuras: 2060 – 2090**

Seguidamente, foi calculada a  $T_R$  das projeções futuras para identificar as geadas no período 2060 – 2090. Neste caso, a simulação RegERAInterim não apresenta projeções futuras pois ela usa dados da EraInterim que são disponíveis apenas até o ano 2015 (visto em janeiro de 2016). Para conhecer a possível mudança dos padrões das geadas, determinou-se os ciclos anuais da frequência de geadas para o futuro, e são apresentados na Figura 3.16.

O ciclo anual de geadas da ZN, calculado para as projeções futuras (Figura 3.16a), mostra uma diminuição da frequência de geadas nas três simulações comparadas com o período presente (Figura 3.13a). Os dois picos de máximos valores de geadas, no inverno e primavera, também estão presentes nas projeções futuras. O RegHadGEM, simulação que apresentou avaliação estatística satisfatória no período presente, gera frequências menores de 1% para todo o ano.

Para a ZC, as três simulações mostram uma diminuição na frequência de geadas em todo o ano (Figura 3.16b e Figura 3.13b). A maior diminuição é projetada ocorrer na estação

do inverno sendo de 18% nas simulações RegGFDL e RegMPI, e 5% no RegHadGEM. No caso da ZS, a maior diminuição também acontece no inverno, onde as simulações RegGFDL e RegMPI projetam 10% menos de geadas e a simulação RegHadGEM, 30% a menos (Figura 3.16c).

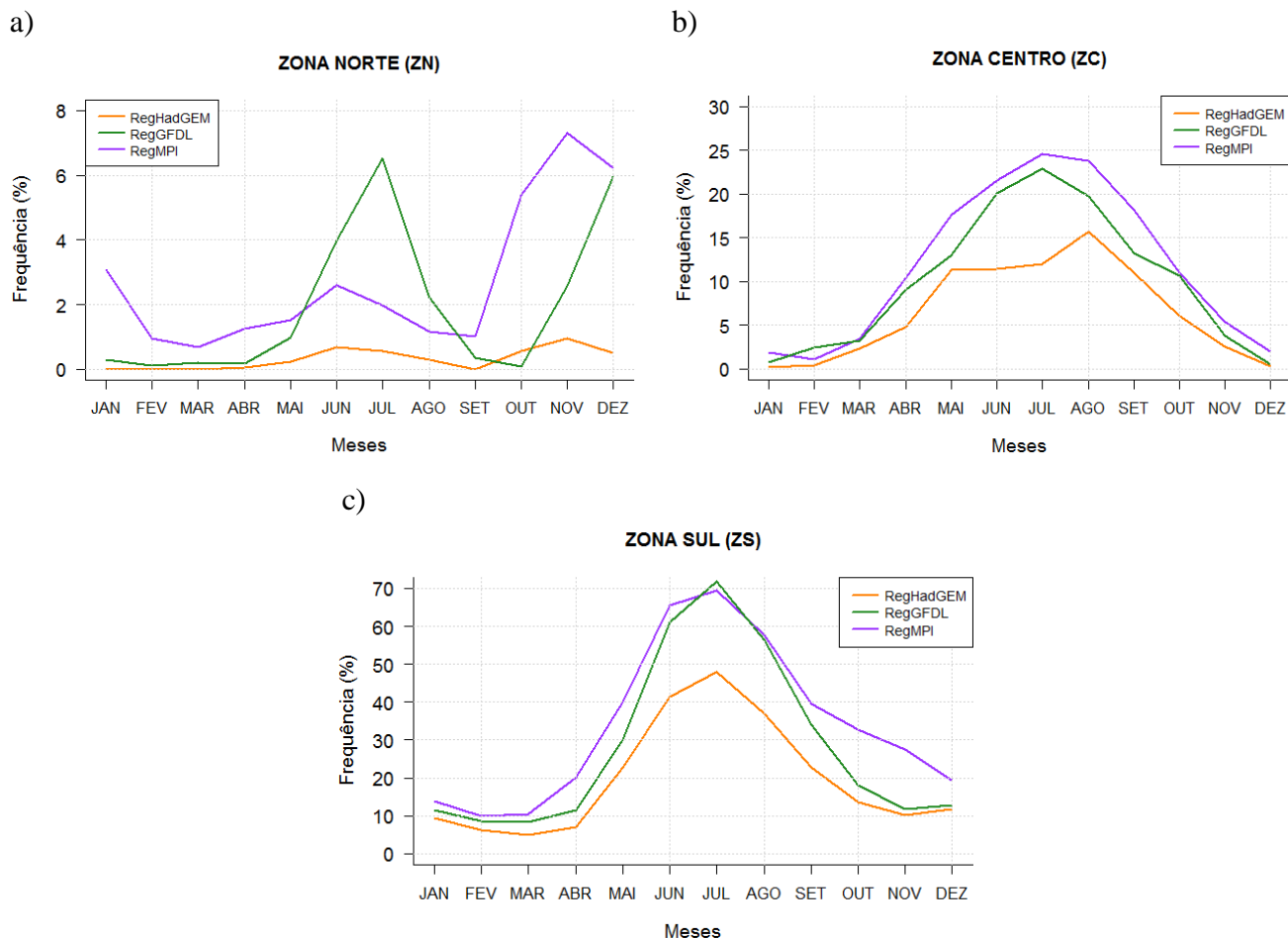


Figura 3.16 Ciclo anual da frequência de geadas, para o período futuro 2060 – 2090, calculado com os dados simulados da (a) ZN, (b) ZC e (c) ZS.

### 3.3 Anomalias de análise de composições

Numa primeira parte, são explicadas as características sinóticas na ocorrência de geadas utilizando os dados da Era-Interim (1979 – 2005). Depois, são apresentadas as anomalias de composições utilizando variáveis meteorológicas dos dados simulados para o clima presente (1971 – 2005) e futuro (2060 – 2090).

### 3.3.1. Características sinóticas na ocorrência de geadas

A Figura 3.17 mostra as anomalias das análises de composições obtidas com os dados da reanálise Era-Interim considerando as datas de geadas da ZC. As outras zonas de análise apresentam os padrões sinóticos similares, mas com valores de anomalias maiores e menores para a ZN e ZS, respectivamente. Os perfis verticais apresentam uma caixa vermelha que corresponde às longitudes e latitude da ZC, 76,5°W – 74,5°W e 12°S nessa ordem.

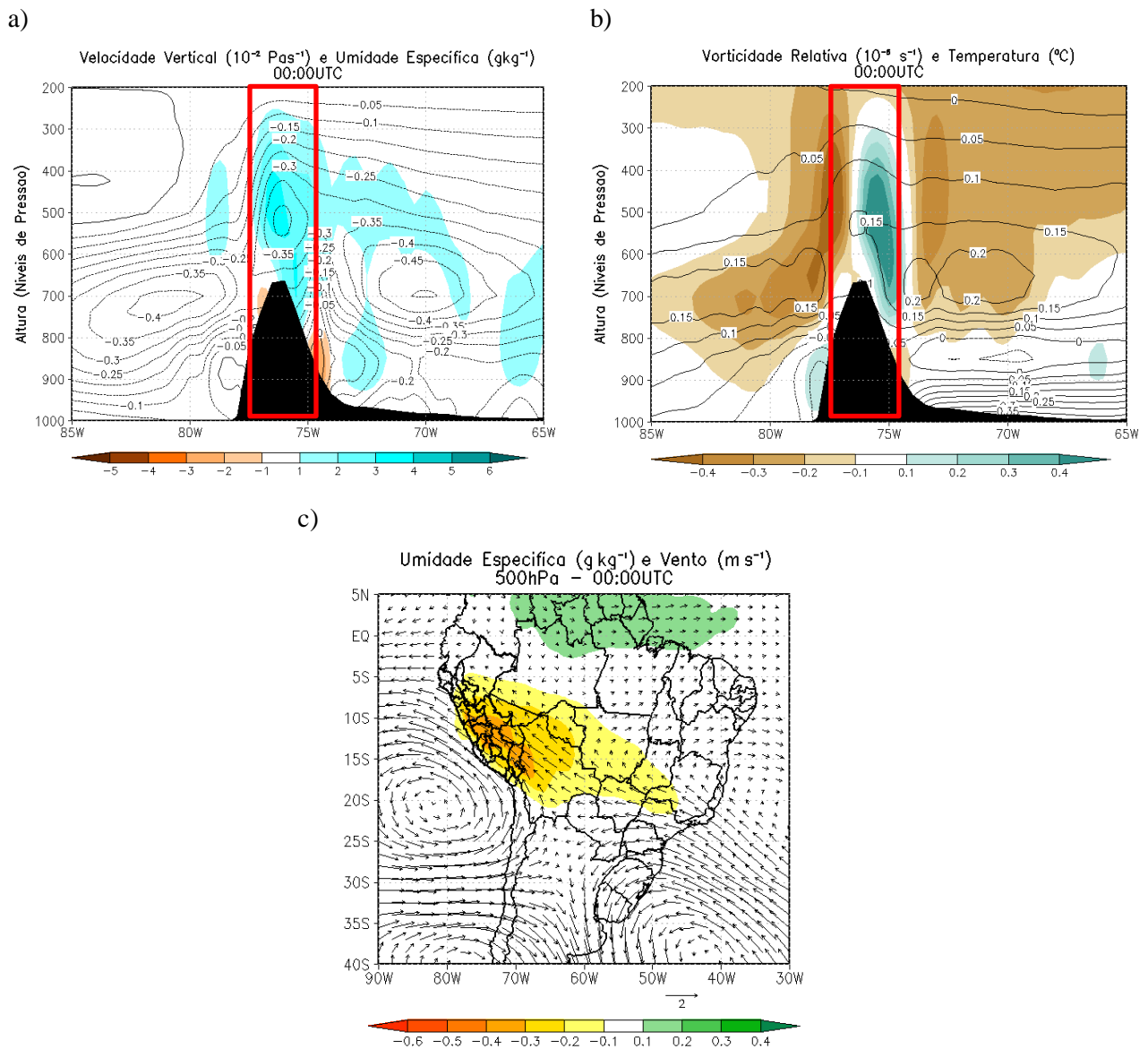


Figura 3.17 Anomalias das composições às 00:00 UTC para as datas em que ocorrem geada no período 1971 – 2005: (a) Perfil vertical da velocidade vertical ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$  – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$  – linhas). (b) Perfil vertical de vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$  – linhas). (c) Umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 500hPa.

Na Figura 3.17a observa-se sobre a ZC um forte núcleo de anomalia positiva da velocidade vertical ômega (sombreado) indicando intensificação de subsidência ou enfraquecimento do movimento ascendente na coluna de ar, o que contribui para dissipação da nebulosidade e fornece condições favoráveis para anomalias negativas da umidade específica (linhas) em todo o domínio. Essa subsidência e falta de nebulosidade na atmosfera, nos dias de ocorrência de geadas, gera condições estáveis associadas com ventos calmos, que pode influenciar o pequeno aumento da temperatura do ar devido ao aquecimento solar no dia que antecede a geada (Figura 3.17b – linhas). Já as temperaturas mínimas do ar, em todo o território peruano, apresentam anomalia negativa quando ocorrem geadas na ZC (Figura 3.18 – sombreado).

A vorticidade relativa mostra uma predominância de anomalia negativa no perfil vertical, no entanto na ZC tem-se um núcleo relativamente forte de anomalia positiva da vorticidade (Figura 3.17b – sombreado). Essa anomalia positiva de vorticidade manifesta um aumento do movimento anti-horário do ar, ou seja, de um sistema de alta pressão que ajudaria a manter as condições de subsidência do ar nos dias de ocorrência de geadas.

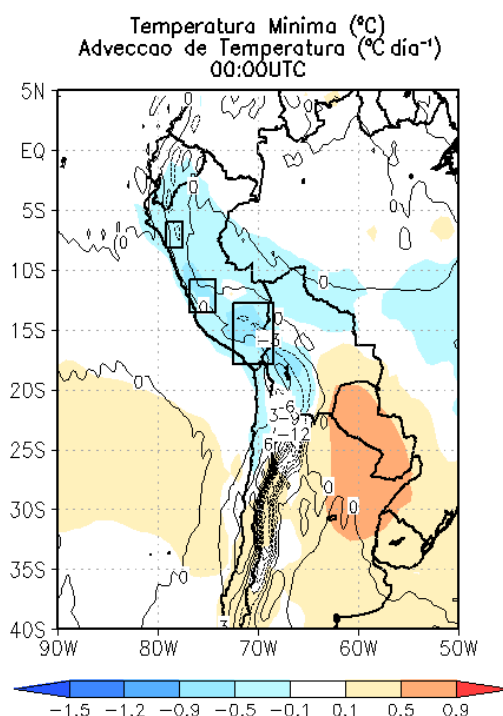


Figura 3.18 Anomalia da composição de temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$  - sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$  – linhas) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005. As caixas representam as zonas de análise (ZN, ZC e ZS).

Destaca-se um núcleo de anomalia negativa da umidade específica na maior parte do território peruano e a parte oeste da Bolívia quando acontecem as geadas, o que estaria de acordo com Dittus *et al.* (2015) que mostrou uma relação entre o incremento na ocorrência de dias com geadas e a diminuição de dias úmidos (Figura 3.17c). Os menores valores de umidade na atmosfera e céus abertos pela subsidência contribuem para presença de anomalia positiva de radiação de onda longa (OLR) no território peruano e boliviano (Figura 3.19), o que indica maior perda de radiação da superfície.

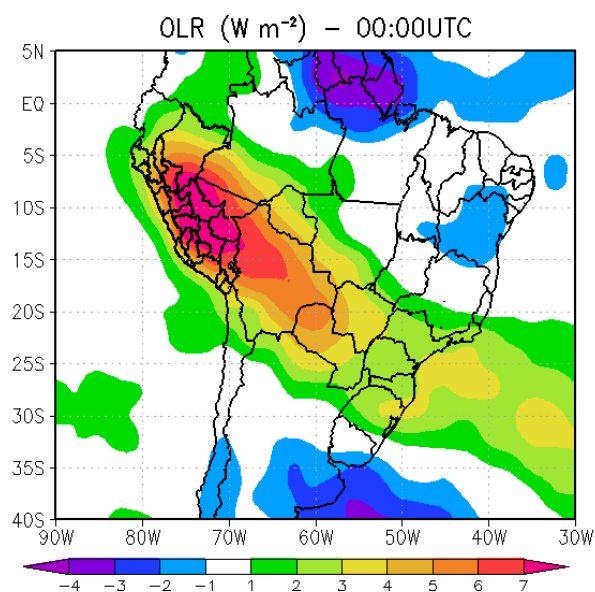


Figura 3.19 Anomalia da composição de radiação de onda longa – OLR ( $W m^{-2}$ ) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005.

No caso da circulação atmosférica (Figura 3.17c), a anomalia dos vetores do vento em 500hPa forma duas anomalias anticiclônicas localizadas em 20°S – 80°W (oceano Pacífico Sul) e 40°S – 40°W (oceano Atlântico Sul) e uma anomalia ciclônica em 40°S – 75°W em 500 hPa. A anomalia ciclônica indica a intensificação do cavado a sudoeste da CA nos dias de geada. A anomalia anticiclônica no oceano Pacífico Sul manifesta ventos de oeste mais fracos atingindo o território peruano nos dias com geadas quando comparado com a predominância de noroeste da média climatológica do vento no inverno em 500 hPa (Figura 3.20). A advecção fria de temperatura, pela anomalia de vento do sul do continente para as regiões de estudo, é mostrada na Figura 3.18 (linhas). O padrão da advecção de temperatura apresentado na Figura 3.18 é típico da CA, muda apenas os valores das intensidades de advecção quando

ocorrem geadas, sendo a advecção mais negativas do que na média climatológica. Observa-se forte advecção negativa de temperatura na parte chilena e argentina da CA, que atinge apenas a parte sul da ZS; já a ZC e ZN apresentam valores mínimos de advecção negativa de temperatura.

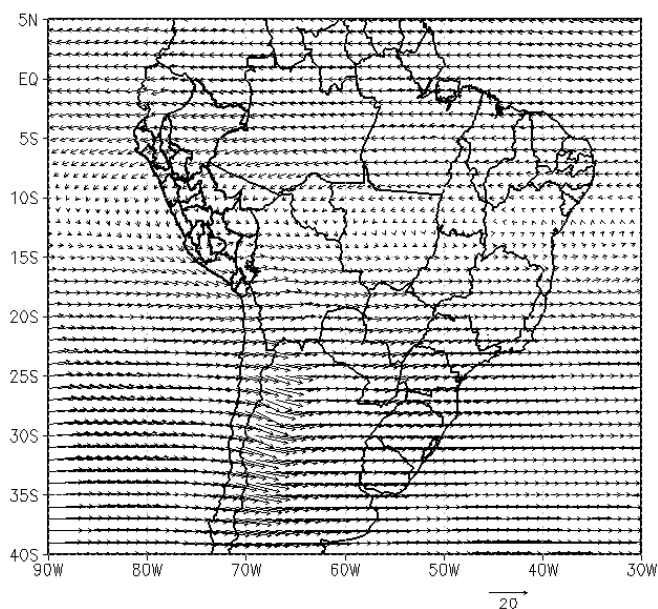


Figura 3.20 Média climatológica do vento ( $\text{ms}^{-1}$ ) em 500hPa no inverno para o período 1971 – 2005.

Portanto, a ocorrência das geadas no período de inverno na serra peruana está mais relacionada com o resfriamento radiativo do que com a advecção negativa de temperatura. Desta forma, o menor conteúdo de umidade na atmosfera e a subsidência, fortalecida pelo sistema de alta pressão, proporcionam condições de céu aberto e diminuição das temperaturas mínimas durante as noites, como também encontrado por Dittus *et al.* (2015).

### 3.3.2. Composições nas simulações

#### ✓ **Clima presente: 1971 – 2005**

De forma similar, calcularam-se as anomalias da análise de composições utilizando as variáveis simuladas para o clima presente, com a finalidade de conhecer a representação dos padrões atmosféricos quando ocorrem geadas nas simulações. Para o período 1971 – 2005, a



Figura 3.21 apresenta os perfis verticais das anomalias de velocidade vertical ômega e umidade específica de cada simulação. Todas as simulações exibem anomalia positiva de velocidade vertical ômega na ZC, tal como é mostrado nos dados de reanálise (Figura 3.17a), mas com valores muito maiores, com a exceção da simulação RegGFDL (Figura 3.21c) que mostra anomalias mais fracas de ômega. Sobre os Andes, as simulações RegERAInterim e RegHadGEM (Figura 3.21a e 3.21b) apresentam anomalia negativa de umidade específica mais forte do que na reanálise (Figura 3.17a); enquanto que o RegGFDL e RegMPI (Figura 3.21c e 3.21d) mostram anomalias de umidade específica similares à da reanálise (Figura 3.17a).

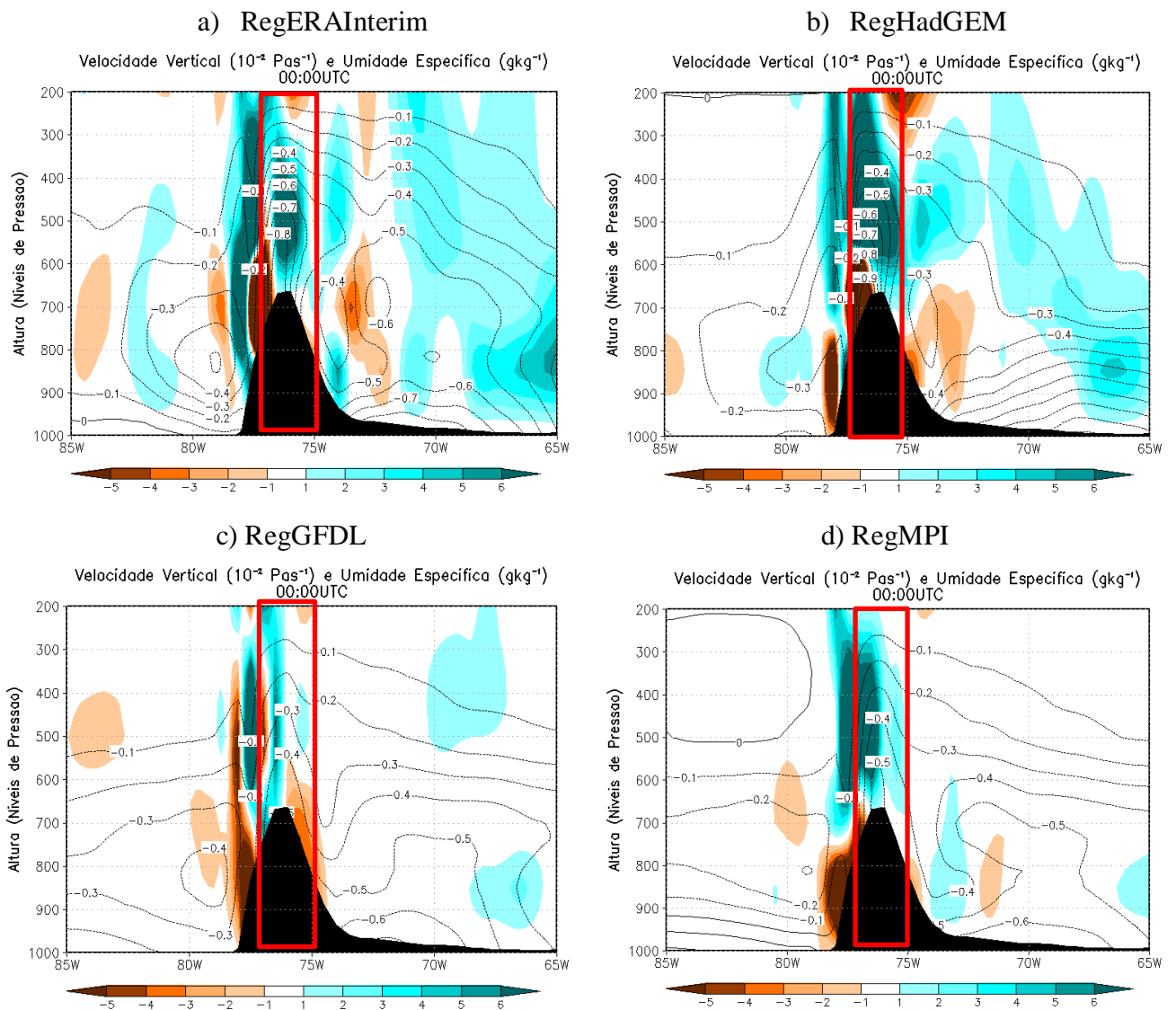


Figura 3.21 Perfil vertical da anomalia das composições da velocidade vertical ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$  – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$  – linhas), às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI.

Com relação à vorticidade relativa e temperatura do ar, a Figura 3.22 exibe as anomalias das composições no período 1971 – 2005 de cada simulação. As quatro simulações mostram o mesmo padrão de anomalia positiva de vorticidade relativa na ZC, tal como os dados de reanálise da Figura 3.17b, porém com valores de anomalia mais intensos que o observado. No caso da anomalia de temperatura do ar, todas as simulações apresentam anomalias negativas, situação distinta que a reanálise mostra na Figura 3.17b com anomalias positivas da temperatura do ar. Esta anomalia negativa da temperatura do ar das simulações pode estar relacionada com subsidência do ar mais forte e sistema de alta pressão mais intenso simulados na área da ZC.

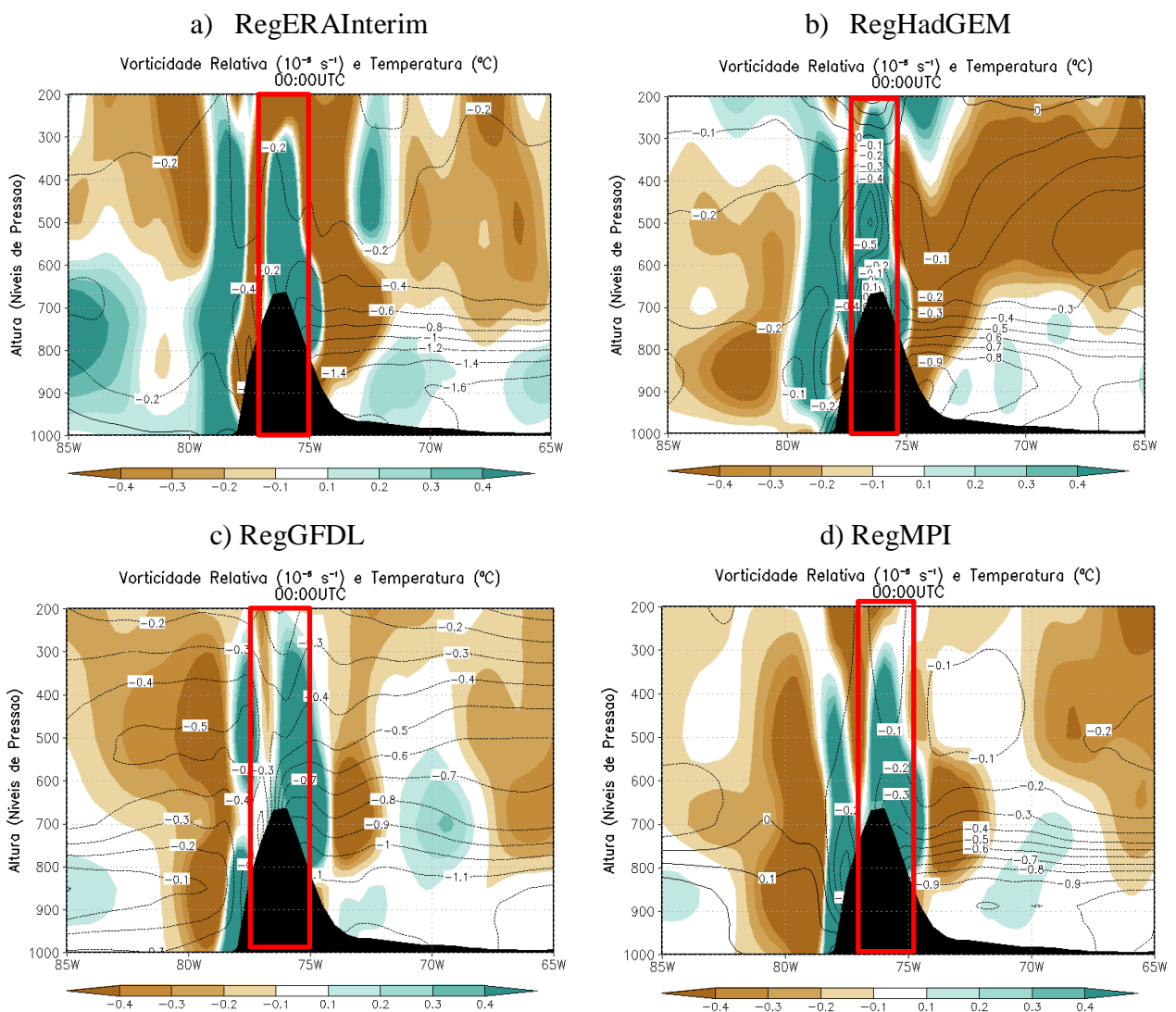


Figura 3.22 Perfil vertical da anomalia das composições da vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$  – linhas), às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI.

Para o período 1971 – 2005, todas as simulações mostram anomalias negativas de umidade específica na serra peruana, com anomalias mais acentuadas nas simulações RegERAInterim e RegHadGEM (Figura 3.23). De todas as simulações, a circulação atmosférica do RegERAInterim (Figura 3.23a) é a mais similar ao observado na Figura 3.17c, sendo que o vento forma as duas anomalias anticiclônicas (uma no oceano Pacífico Sul em 20°S – 80°W e outra no oceano Atlântico Sul em 40°S – 40°W) e a anomalia ciclônica (no Pacífico em 40°S – 75°W), mas com menor intensidade. O RegHadGEM (Figura 3.23b) apresenta a anomalia anticiclônica no Pacífico Sul, porém localizada mais para o sul da posição mostrada na Figura 3.17c (30°S – 90°W), enquanto que a anomalia anticiclônica no Atlântico Sul encontra-se na mesma posição que na reanálise. O RegGFDL reproduz apenas a anomalia anticiclônica no Atlântico Sul com uma circulação anti-horária fraca no litoral chileno (Figura 3.23c). Já o RegMPI mostra as anomalias anticiclônicas no Pacífico e Atlântico unidas (Figura 3.23d).

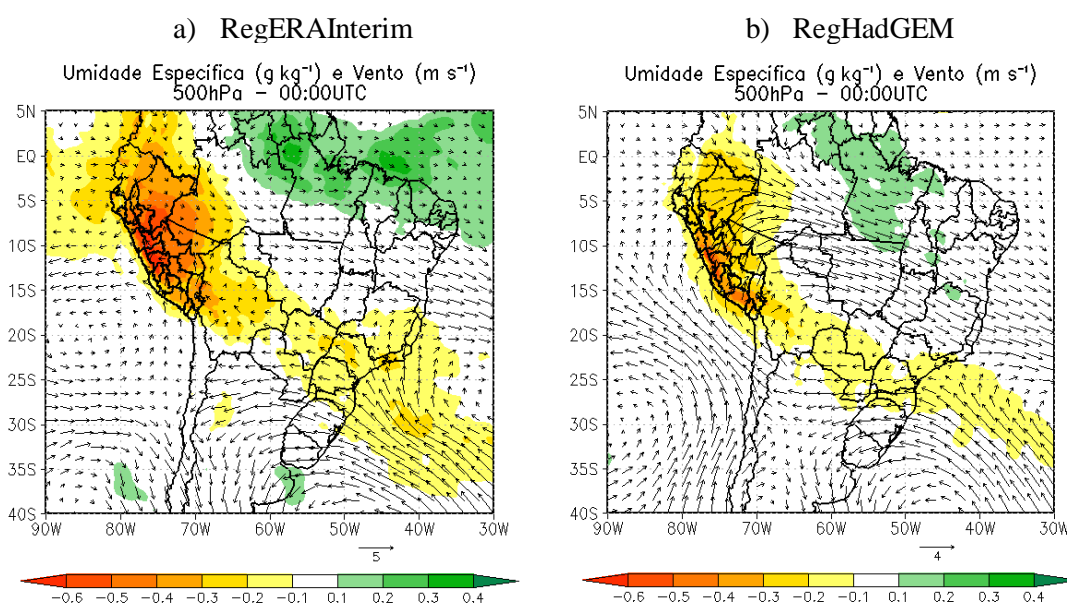


Figura 3.23 Anomalia das composições da umidade específica ( $\text{g.kg}^{-1}$ ) e velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) em 500hPa, às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI.

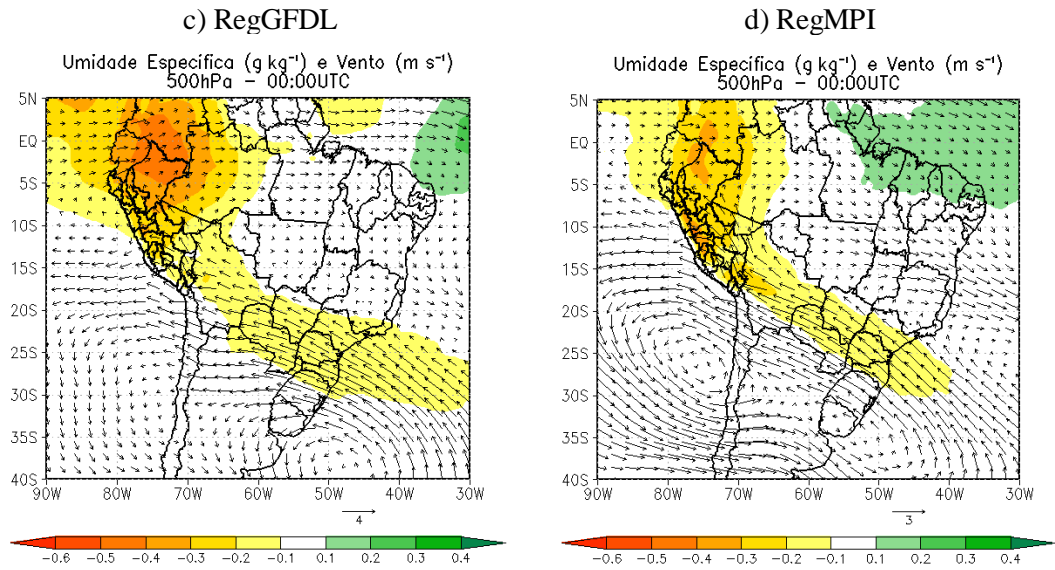


Figura 3.23 – Continuação.

Desta forma, sobre o Peru e vizinhanças os ventos de oeste são mais fracos nas simulações RegERAInterim, RegGFDL e RegMPI, enquanto que o RegHadGEM mostra vento de oeste mais fortes atingindo o território peruano nos dias de geadas.

O padrão de anomalia negativa da temperatura mínima do ar no território peruano mostrado na Figura 3.18 também está presente nas simulações, mas com maior intensidade e ocupando uma grande área que se estende até o Brasil (Figura 3.24). As anomalias positivas da temperatura mínima no oceano Pacífico e na Argentina mostradas na reanálise (Figura 3.18), não estão apresentados na simulação RegHadGEM, que contrariamente, mostra anomalias negativas nessas regiões (Figura 3.24b). Todas as simulações indicam valores mínimos de advecção negativa de temperatura na parte peruana da CA nos dias com geadas, como exibido na Figura 3.18.

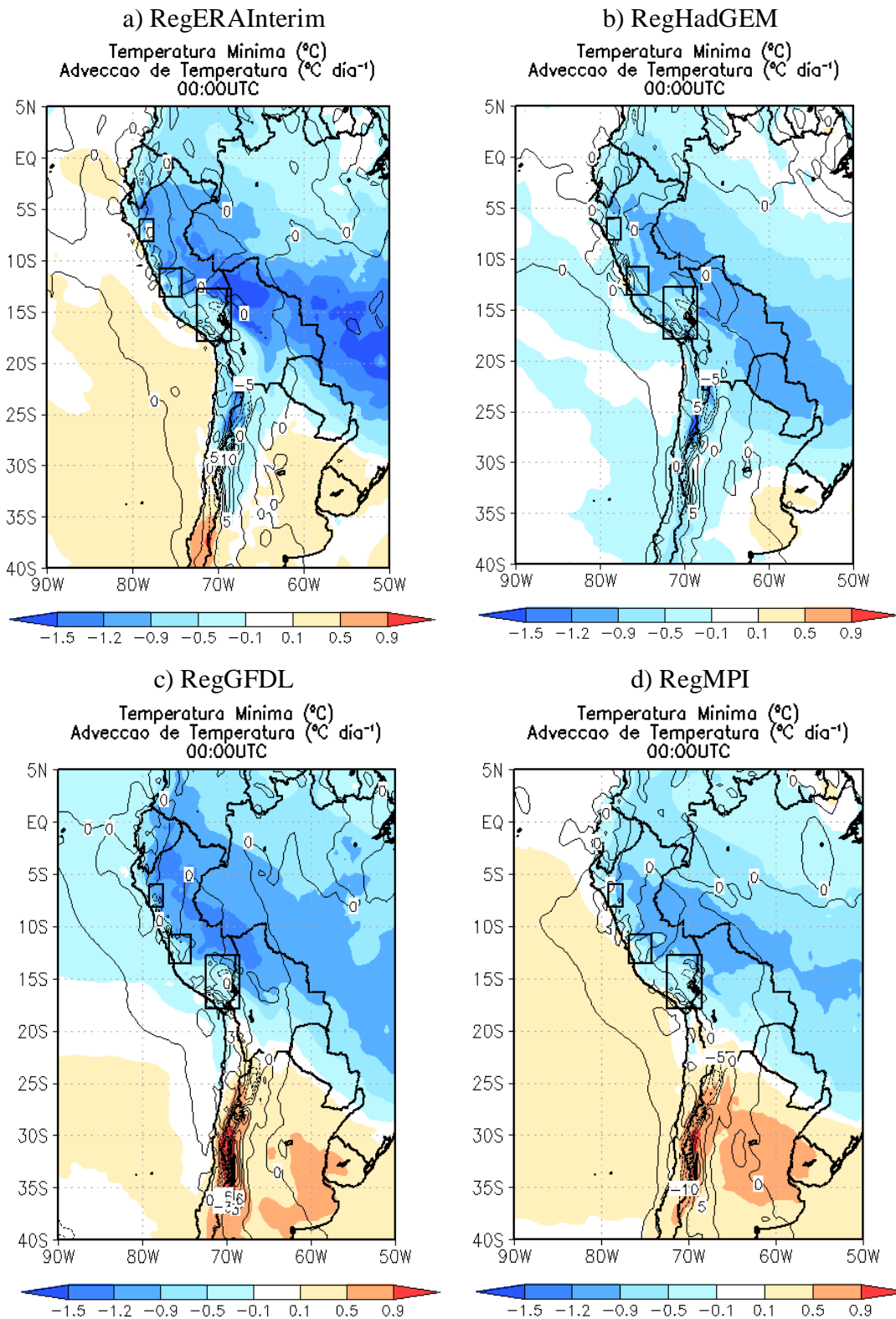


Figura 3.24 Anomalia da composição de temperatura mínima do ar (°C - sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa (°C dia<sup>-1</sup> - linhas) às 00:00 UTC para o período 1971 – 2005 das simulações (a) RegERAInterim, (b) RegHadGEM, (c) RegGFDL e (d) RegMPI. As caixas representam as zonas de análise (ZN, ZC e ZS).

Considerando o exposto, as simulações têm a capacidade de reproduzir a maior parte dos padrões sinóticos quando acontecem geadas na serra peruana: subsidência do ar, baixa umidade atmosférica, ventos calmos de oeste, queda da temperatura mínima do ar e fraca advecção negativa de temperatura. Vale dizer que os valores de anomalias das simulações são sempre maiores do que as anomalias da reanálise Era-Interim.

✓ **Projeções futuras: 2060 – 2090**

Para o período futuro 2060 – 2090, as anomalias das composições foram calculadas apenas para três simulações desde que as mesmas apresentam projeções para o futuro. As três projeções futuras mostram valores de anomalia negativa de umidade específica mais forte que no clima presente. Porém ocorre um estreitamento da área de subsidência e um aumento da região com anomalia ascendente a oeste da célula subsidente na ZC para o clima futuro (Figura 3.25). Em termos de intensidade, ocorre intensificação da subsidência no RegHadGEM e RegGFDL na ZC.

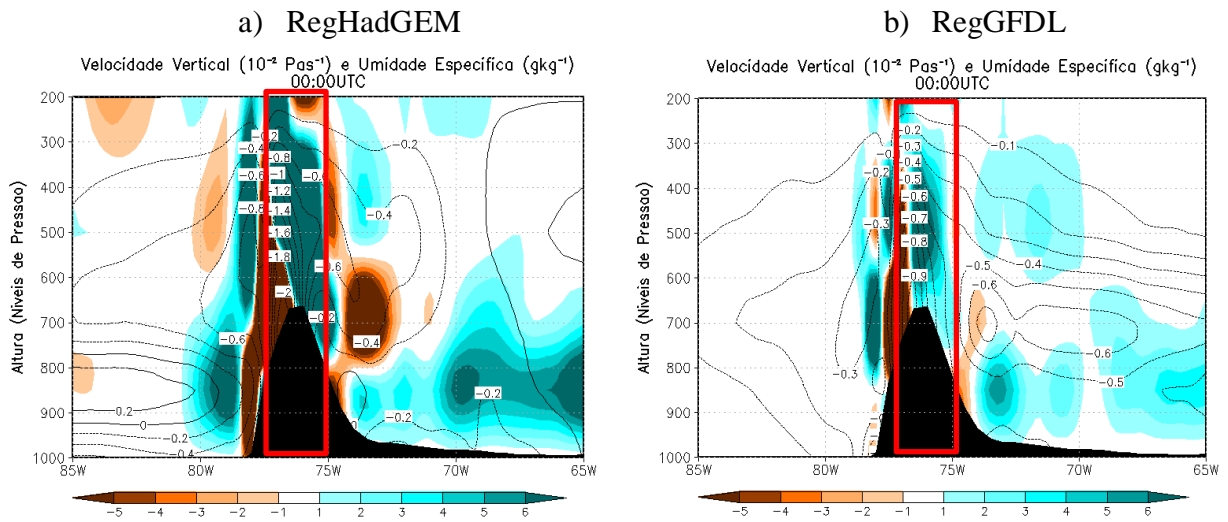


Figura 3.25 Perfil vertical da anomalia das composições da velocidade vertical ômega ( $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$  – sombreado) e umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$  – linhas), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI.

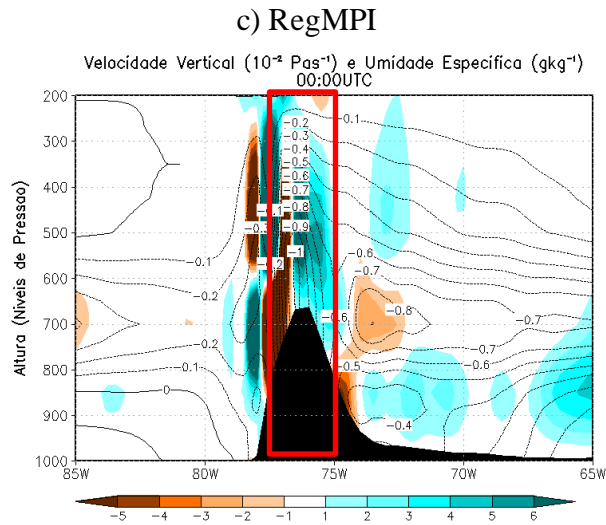


Figura 3.25 – Continuação.

A Figura 3.26 mostra as anomalias da vorticidade relativa e temperatura do ar. A anomalia negativa da temperatura do ar mantém-se nas projeções futuras, enquanto que a área ocupada pela anomalia positiva da vorticidade relativa diminui na ZC (Figura 3.26). Essa situação pode estar relacionada com a diminuição da área de subsidência, já que o sistema de alta pressão que organiza o movimento descendente do ar se enfraqueceria.

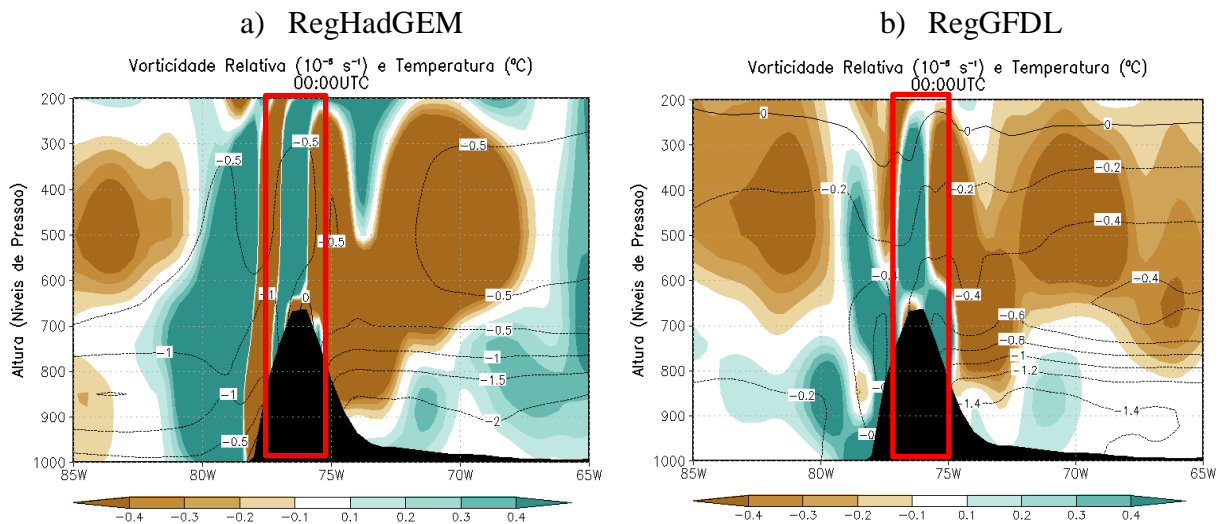


Figura 3.26 Perfil vertical da anomalia das composições da vorticidade relativa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  – sombreado) e temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$  – linhas), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI.

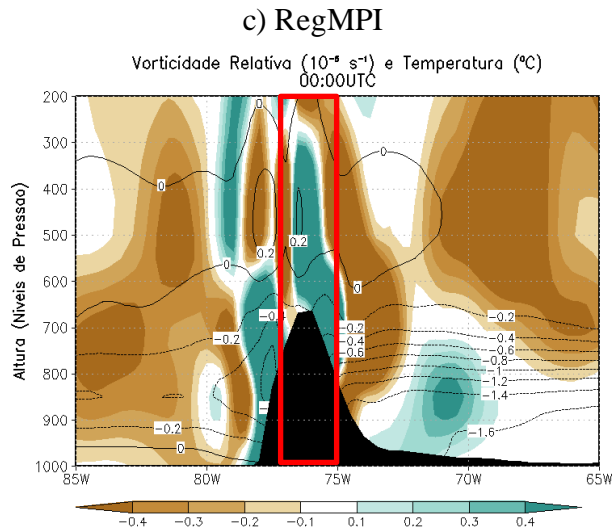


Figura 3.26 – Continuação.

Para a umidade específica do ar, a Figura 3.27 mostra as anomalias das projeções. Nas três simulações, a região e intensidade de anomalias negativas da umidade são maiores que no clima presente como visto na Figura 3.25 (linhas). A circulação atmosférica das projeções do RegGFDL e RegMPI são muito similares entre si no clima futuro, sendo que ambas apresentam ventos oeste mais fracos que atingem o território peruano (Figura 3.27b-c). O RegGFDL mantém o mesmo padrão de circulação do clima presente e no RegMPI, muda a posição meridional da anomalia anticiclônica de vento no Pacífico ( $25^{\circ}\text{S} - 75^{\circ}\text{W}$ ) para uma posição mais zonal ( $25^{\circ}\text{S} - 85^{\circ}\text{W}$ ). Enquanto que o RegHadGEM muda o padrão de anomalia de circulação comparado ao clima presente, deslocando para o leste a anomalia anticiclônica no Atlântico ( $40^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{W}$ ) e mostra ventos de oeste mais fortes que no clima presente nos dias com geadas (Figura 3.27a).



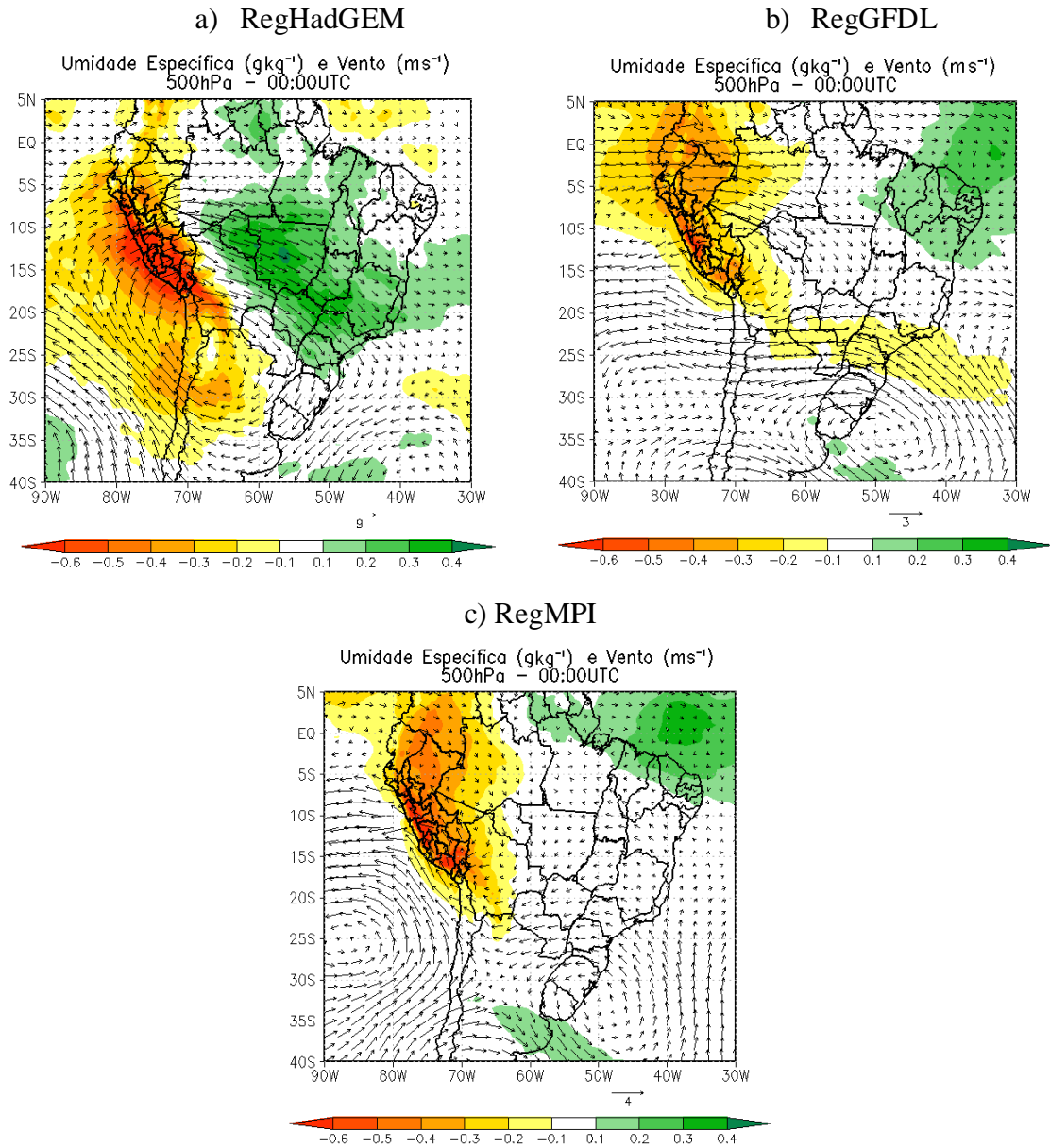


Figura 3.27 Anomalia das composições da umidade específica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI.

As projeções futuras do RegHadGEM e RegMPI mostram anomalias negativas da temperatura mínima do ar mais frias e ocupando maior área do que no clima presente nos dias com geadas (Figura 3.28a e Figura 3.28c), em contraste com o RegGFDL que mantém as anomalias negativas da temperatura mínima do ar similares ao clima presente no território peruano (Figura 3.28b). Em relação à advecção de temperatura, persistiriam valores mínimos de advecção negativa na região peruana da CA no clima futuro.

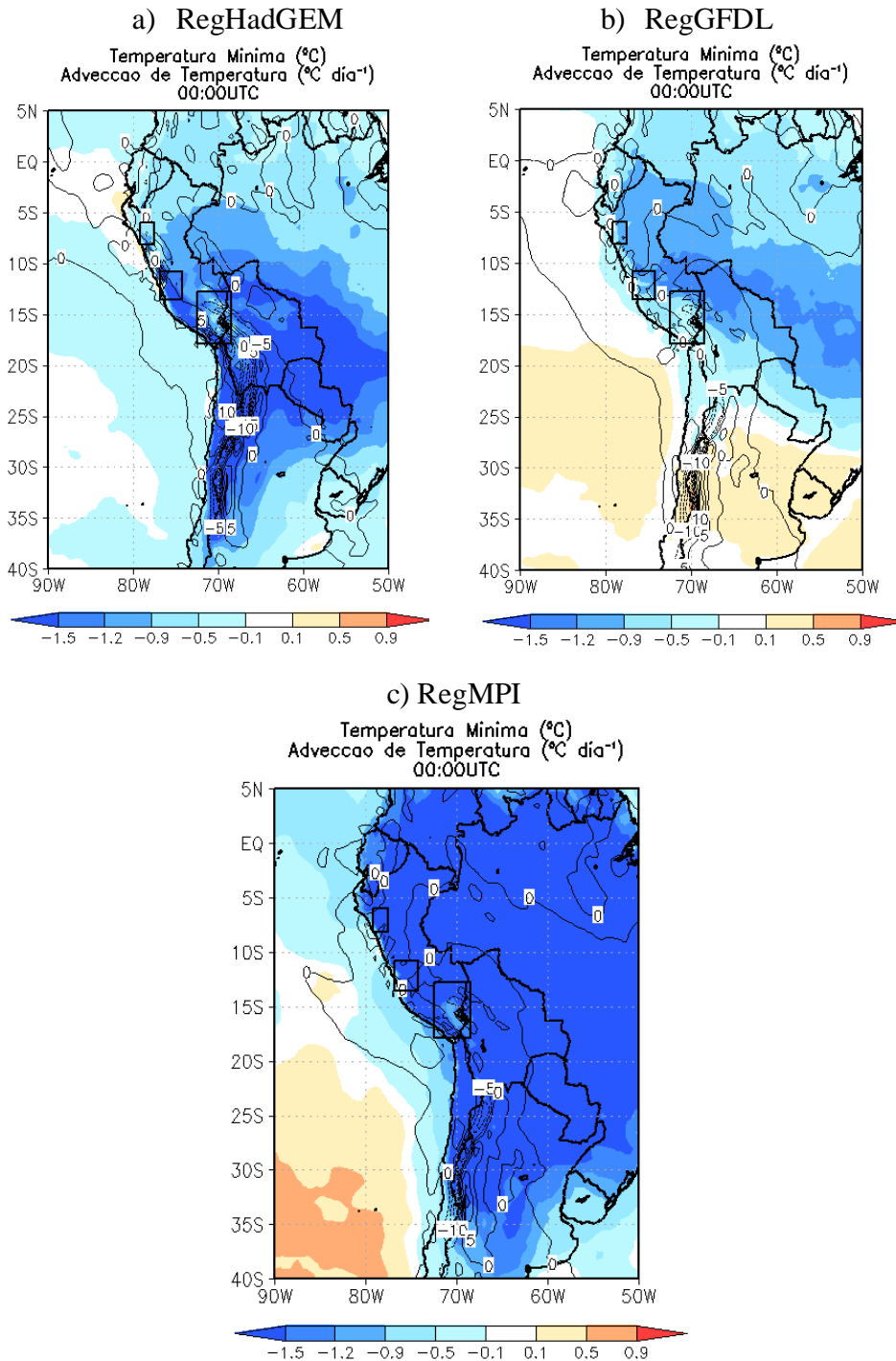


Figura 3.28 Anomalia da composição da temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$  – sombreado) e advecção de temperatura em 500hPa ( $^{\circ}\text{C dia}^{-1}$ ), às 00:00 UTC para o período 2060 – 2090 das simulações (a) RegHadGEM, (b) RegGFDL e (c) RegMPI.

Em suma, todas as projeções futuras mostram a diminuição da área de subsidência e vorticidade positiva na ZC na ocorrência de geadas para o período 2060 – 2090, quando comparado com o clima presente. A projeção do RegGFDL, que apresentou índices

estatísticos mais realísticos dos ciclo anuais da temperatura mínima do ar (Figura 3.6d) e frequência de geadas (Figura 3.14b) considerando o *perfect prog* para a ZC, mantém as anomalias negativas da temperatura do ar no clima futuro. Já o RegHadGEM e RegMPI, mostram anomalias mais frias da temperatura mínima do ar no para o clima futuro. Portanto, a simulação RegGFDL indica diminuição da ocorrência de geadas e mantém a intensidade desses eventos no futuro; enquanto que o RegHadGEM e RegMPI, também manifestam diminuição da ocorrência de geadas, mas devido que a anomalia de temperatura mínima fica mais fria, os eventos de geadas no futuro seriam mais intensos.

## 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o comportamento da frequência de geadas em dados observados de estações meteorológicas e de simulações para o período presente e projeções futuras, buscando identificar possíveis mudanças na ocorrência destes eventos. Para isso, utilizou-se a técnica de *perfect prog* com a finalidade de reduzir o bias quente na temperatura mínima do ar no clima presente e então identificar geadas nas simulações. Além disso, aplicou-se a técnica de análise de composições para descrever os padrões sinóticos predominantes quando acontecem geadas na região da serra peruana.

Antes de aplicar o *perfect prog*, analisou-se a acurácia dos dados simulados para representar o ciclo anual observado da temperatura mínima do ar. O ciclo anual observado das temperaturas mínimas mostrou diferentes amplitudes nas três zonas de análise, sendo que a amplitude térmica aumenta desde a zona norte (ZN) até a zona sul (ZS). Com relação ao ciclo anual simulado, as simulações RegERAInterim e RegHadGEM apresentam maiores valores de bias quente do que o RegGFDL e RegMPI para toda a região da serra peruana. Já as estatísticas (desvio padrão, correlação e erro médio quadrático) do ciclo anual do RegERAInterim e RegHadGEM são melhores do que as do RegGFDL e RegMPI na ZN e zona centro (ZC). Para a ZS, nenhuma simulação representa a grande amplitude térmica da temperatura mínima anual, mas apresentam uma alta correlação, acima de 0,95, com o ciclo observado.

Os dados da Era-Interim (temperatura mínima, umidade específica, velocidade ômega e as componentes zonal e meridional do vento) foram utilizados como preditores e os dados observados da temperatura mínima como preditando para construir as regressões lineares múltiplas do *perfect prog*. Nas regressões, obtiveram-se valores de  $R^2$  múltiplo entre 0,54 e 0,85 e p-values menores que 0,01 com significância estatística de 0,05. Na avaliação entre as temperaturas reconstruídas com as equações lineares e os dados observados, obteve-se alta correlação (0,6 – 0,8) entre as séries. Portanto, aplicou-se o *perfect prog* nos dados simulados e avaliou-se o ciclo anual simulado considerando a temperatura mínima simulada e reconstruída ( $T_R$ ) de cada simulação. O uso do *perfect prog* diminuiu o bias quente e melhorou as estatísticas de todas as simulações especialmente para as ZC e ZS, enquanto que

na ZN o uso do *perfect prog* permitiu diminuir o bias quente das simulações RegHadGEM e RegERAInterim e melhorou os índices estatísticos do RegGFDL.

Na identificação de geadas nos dados observados no clima presente (1971 – 2005), as frequências anuais na ZN revelam tendências positivas em todas as estações do ano com uma tendência maior no inverno. Na ZC, as frequências de geadas têm tendências negativas no verão e outono, enquanto que no resto do ano não se observam tendências. No caso da ZS, as tendências de geadas são quase nulas com pequena tendência positiva no inverno e primavera.

O ciclo anual observado de frequência de geadas foi analisado nas simulações desde que os modelos climáticos não reproduzem o dia a dia de eventos extremos, mas podem reproduzir padrões gerais do clima presente e mudanças futuras no clima. A frequência de geadas nas observações aumenta do norte para o sul, com picos máximos de 4%, 60% e 80% em relação ao ano todo para a ZN, ZC e ZS, respectivamente. Na ZC e ZS, o ciclo anual observado de frequência de geadas é representado por uma curva com valores máximos no inverno e mínimos no verão. Por outro lado, o ciclo anual observado de geadas na ZN apresenta dois picos de máximos valores de geadas, no inverno e primavera, sendo novembro o mês que apresentou o valor mais alto na primavera devido à alta frequência atípica de geadas no ano 2000 associada à persistência de 2,5 anos do fenômeno La Niña.

Depois de aplicar o *perfect prog* nos dados simulados, se identificou e determinou o ciclo anual de frequência das geadas das simulações. Ao comparar o ciclo anual simulado e observado no clima presente 1971 – 2005, observou-se que o RegERAInterim e RegHadGEM apresentam melhores estatísticas que as outras simulações na ZN. Na ZC, as simulações RegGFDL e RegMPI representam melhor o ciclo anual de geadas; enquanto que na ZS, todas as simulações apresentam ciclo anual de geadas similar ao observado. O ciclo anual das projeções futuras, considerando um cenário de aumento da concentração de gases de efeito estufa, mostra uma diminuição da frequência de geadas para o futuro nas três zonas de análise.

As anomalias de composições, calculadas com os dados de reanálise Era-Interim para representar as condições observadas, indicam que na parte peruana da Cordilheira dos Andes

(CA) as geadas no inverno são causadas principalmente por perda radiativa, dado que a advecção de temperatura é fraca e atinge apenas a parte sul da ZS. O resfriamento radiativo nas noites é provocado pela diminuição da umidade na atmosfera, ventos de oeste mais fracos e subsidência do ar, mantida pelo aumento da vorticidade positiva nos dias com geadas, fornecendo condições de céus abertos que facilitam a perda de calor absorvida durante o dia pela superfície terrestre. As anomalias de composições, calculadas com dados atmosféricos das simulações, mostram a capacidade dos modelos em reproduzir os padrões sinóticos obtidos da reanálise Era-Interim, mas com valores maiores de anomalias da umidade específica, velocidade ômega e vorticidade relativa. Com respeito às anomalias de composições das projeções futuras, todas as simulações apresentam um estreitamento da largura horizontal da área tanto da subsidência como da vorticidade anticiclônica. A projeção do RegGFDL mantém intensidade da anomalia negativa da temperatura mínima similar ao clima presente, enquanto que as projeções do RegHadGEM e RegMPI, apresentam anomalias mais negativas da temperatura mínima no clima futuro. Portanto, a simulação RegGFDL indicaria um cenário de diminuição da ocorrência de geadas mantendo a intensidade desses eventos no futuro; enquanto que os cenários do RegHadGEM e RegMPI, manifestam diminuição da frequência de geadas, mas devido as anomalia negativas da temperatura mínima serem maiores, os eventos de geadas no futuro seriam mais intensos.



## 5 SUGESTÕES E PERSPECTIVAS

Esta pesquisa visou contribuir para as tomadas de decisões na aplicação de planos de prevenção e mitigação dos impactos atuais e futuros na região andina do Peru, assim como estabelecer o início dos estudos científicos em relação às geadas no país.

Com a realização deste estudo surgiram muitas questões importantes a serem avaliadas. Como o fenômeno do El Niño é um fenômeno de escala global e afeta os padrões de circulação atmosférica, é necessário conhecer o comportamento da geada quando ocorre esse fenômeno. Estudar não só a frequência das geadas num ano El Niño, senão também as intensidades das mesmas representadas pela temperatura mínima absoluta diária, pois assim como maior frequência de geada impacta a agricultura, uma forte queda repentina da temperatura mínima do ar poderia afetar também a saúde da população.

A análise da OLR nas composições mostrou várias regiões remotas no globo, como por exemplo, o Mar Árabe (10°S – 20°S, 60°E – 80°E), com fortes anomalias positivas quando acontecem as geadas no Peru, mostrando a necessidade de investigar a possibilidade de padrões de teleconexões com outras partes do globo na ocorrência de geadas com a finalidade de aumentar as técnicas de previsão destes eventos.

A resolução das simulações utilizadas não podem fornecer projeções climáticas precisas nos Andes, dada à topografia complexa, mas o uso de simulações de mais alta resolução na análise da ocorrência de geadas pode representar melhor as características climáticas da região.





## REFERÊNCIAS

- ANANDHI, A., ZION, M. S., GOWDA, P. H., PIERSON, D. C., LOUNSBURY, D., & FREI, A. (2012). **Past and future changes in frost day indices in Catskill Mountain region of New York.** *Hydrological Processes*, 27, 3049-3104.  
<http://doi.org/10.1002/hyp.9937>
- ANANDHI, A., PERUMAL, S., GOWDA, P. H., KNAPP, M., HUTCHINSON, S., HARRINGTON, J., et al. (2013). **Long-term spatial and temporal trends in frost indices in Kansas, USA.** *Climatic Change*, 120, 169–181.  
<http://doi.org/10.1007/s10584-013-0794-4>
- ANDRADE, M. & BLACUTT, L. (2010). **Evaluation of the PRECIS regional climate model for the region of Bolivia: Comparison with ground based data.** *Revista Boliviana de Física* v.17 n.17. La Paz.
- ANTHES RA, HSIE EY, KUO YH (1987) **Description of the Penn State/NCAR Mesoscale 480 Model Version 4 (MM4).** National Center for Atmo spheric Research Tech Note TN-481 282+STR, NCAR, Boulder, CO.
- BARLOW, K., CHRISTY, B., LEARY, G. O., & NUTTALL, J. (2015). **Modelling the impact of frost on wheat production in Australia models,** (September), 1–4.
- BAZO ZAMBRANO, J. C. (2014). **Proyecciones climáticas sobre Perú y su relación con el fenómeno ENSO.** Tese de Doutorado em Ciências do Clima. Universidad de Vigo.
- COMUNIDAD ANDINA. SECRETARIA GENERAL. (2009). **Cuando hiela. En Atlas de las dinámicas del territorio Andino: Población y bienes expuestos a amenazas naturales.** (p. 132 – 139).
- DA ROCHA, R. P., REBOITA, M. S., DUTRA, L. M. M., LLOPART, M. P., & COPPOLA, E. (2014). **Interannual variability associated with ENSO: present and future climate projections of RegCM4 for South America-CORDEX domain.** *Climatic Change*, 95–109. DOI: 10.1007/s10584-014-1119-y.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD, P., POLI, P., KOBAYASHI, S., et al. (2011). **The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of**

**the data assimilation system.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(April), 553–597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>

DICKINSON RE, ERRICO RM, GIORGI F, BATES GT (1989) **A regional climate model for the 522 western United States.** Climatic Change 15: 383–422

DICKINSON RE, HENDERSON-SELLERS A, KENNEDY P.J (1993) **Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Model.** NCAR Tech. Note NCAR/TN-3871STR, 72 pp.

DITTUS, A J., KAROLY, D. J., LEWIS, S. C., & ALEXANDER, L. V. (2015). **An investigation of some unexpected frost day increases in southern Australia,** 64 (JANUARY), 261–271.

DUNNE JP ET AL. (2012). **GFDL’s ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics.** J. Climate, 25, 6646–6665.

EASTERLING, D. R. (1997). **Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe.** Science, 277 (November 2015), 364–367. <http://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>

EMANUEL KA, ZIVKOVIC-ROTHMAN M (1999). **Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models.** J Atmos Sci 56: 1766–1782.

FERNANDEZ, J. P. R., FRANCHITO, S. H., & RAO, V. B. (2006). **Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. Part I: Mean climatology.** Theoretical and Applied Climatology, 86, 247–260. DOI: 10.1007/s00704-005-0212-6.

GARCIA, M., RAES, D., JACOBSEN, S. E., & MICHEL, T. (2007). **Agroclimatic constraints for rainfed agriculture in the Bolivian Altiplano.** Journal of Arid Environments, 71, 109–121. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.02.005.

GARREAUD, R. D., & ACEITUNO, P. (2001). **Atmospheric circulation over South America: mean features and variability.**

GARREAUD, R., VUILLE, M., & CLEMENT, A. C. (2003). **The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes.** Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 194, 5–22. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00269-4.

GARREAUD, R. D., VUILLE, M., COMPAGNUCCI, R., & MARENGO, J. (2009). **Present-day South American climate.** Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281, 180-195. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

- GIORGETTA, M.A., et al (2013). **Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5.** Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5, 572-597. doi:10.1002/jame.20038
- GIORGI F, MARINUCCI MR, BATES G (1993a) **Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes.** Mon 561 Wea Rev 121: 2794–2813.
- GIORGI F, MARINUCCI MR, BATES G, DECANIO G (1993b) **Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II. Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions.** Mon Wea Rev 121:2814–2832
- GIORGI, F., JONES, C, ASRAR G. (2009). **Addressing Climate information needs at the regional level: the CORDEX framework.** World Meteorol Organ Bull 58:175-183.
- GIORGI, F., COPPOLA, E., SOLMON, F., MARIOTTI, L., AND OTHERS (2012). **RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains.** Climate Research, 52, 7–29. DOI: 10.3354/cr01018.
- GRELL GA (1993). **Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations.** Mon Weather Rev 121:764–787.
- INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERU (IGP). (2014). **Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño.** Boletín técnico. Vol.1 N°2.
- INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL DEL PERÚ (INDECI). (2008). **Documento País 2008. Vulnerabilidades, Capacidades y Gestión de Riesgo en la República del Perú** (p. 177).
- KEGGENHOFF, I., ELIZBARASHVILI, M., AMIRI-FARAHANI, A., & KING, L. (2014). **Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971–2010.** Weather and Climate Extremes, 4, 75–85.  
<http://doi.org/10.1016/j.wace.2014.05.001>
- KLEIN, W. H., B. M. LEWIS, AND I. ENGER, (1959). **Objective prediction of five-day mean temperature during winter.** *J. Meteor.*, 16, 672–682.
- LAWRIMORE, J. H., HALPERT, M. S., BELL, G. D., MENNE, M. J., LYON, B., SCHNELL, R. C., et al. (2001). **Climate assessment for 2000.** Bulletin of the American Meteorological Society, 82, S1–S55.
- LIU, X., YIN, Z.-Y., SHAO, X., & QIN, N. (2006). **Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season**

**length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961–2003.** *Journal of Geophysical Research*, 111, D19109. <http://doi.org/10.1029/2005JD006915>

LLOPART, M. P. (2014). **Impacto da representação solo-planta-atmosfera em simulações climáticas regionais para a América do sul.** Tese de Doutorado em Meteorologia. IAG/Universidade de São Paulo.

MARAUN, D., WETTERHALL, F., IRESON, A. M., CHANDLER, R. E., KENDON, E. J., WIDMANN, M., et al. (2010). **Precipitation downscaling under Climate Change. Recent developments to bridge the gap between dynamical**, pag. 1–38.

MARENGO, J. A., AMBRIZZI, T., DA ROCHA, R. P., ALVES, L. M., et al. (2010). **Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models.** *Climate Dynamics*, 35, 1089–1113. DOI: 10.1007/s00382-009-0721-6.

MARTIN, G. M., BELLOUIN, N., COLLINS, W. J., CULVERWELL, I. D., HALLORAN, P. R., HARDIMAN, S. C., et al. (2011). **The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations.** *Geoscientific Model Development*, 4, 723–757. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011.

MARTÍNEZ, R., CARRASCAL, D., ANDRADE, M., BLACUTT, L., et al. (2012). Síntesis del Clima de los Andes Tropicales. En Herzog, S., Martínez, R., Jørgensen, & P., Tiessen, H. (2012). **Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales** (p. 117 – 130).

MARZBAN, C., SANDGATHE, S., & KALNAY, E. (2006). **MOS, perfect prog, and reanalysis.** *Monthly Weather Review*, 134(2003), 657–663. <http://doi.org/10.1175/MWR3088.1>

MEEHL, G. A., TEBALDI, C., & NYCHKA, D. (2004). **Changes in frost days in simulations of twentyfirst century climate.** *Climate Dynamics*, 23(August), 495–511. <http://doi.org/10.1007/s00382-004-0442-9>

MEEHL GA, BONY S (2011). **Introduction to CMIP5 Clivar Exchanges**, 16( 2) : 4-5.

MITCHELL, T. D., & JONES, P. D. (2005). **An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids.** *International Journal of Climatology*, 25, 693–712. DOI: 10.1002/joc.1181.

MOTA, G. (2003). **Characteristics of rainfall and precipitation features defined by the Tropical Rainfall Measuring Mission.** PhD thesis. University of Utah.

- NICOLINI, M., SALIO, P., KATZFEY, J. J., MCGREGOR, J. L., & SAULO, A. C. (2002). **January and July regional climate simulation over South America.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107. DOI: 10.1029/2001JD000736.
- OLESON KW, DAI Y, BONAN G, BOSILOVICH M, et al. (2004). **Technical description of the community land model.** Tech Note NCAR/ TN-461+STR, National Center for Atmospheric Research NCAR, Boulder, CO.
- RAHIMI, M. (2011). **Trends in frost days, late and early frost dates and the frost-free season over Iran during 1951-2005.** Presented in Conference WCRP OSC Climate Research in Service to Society, At Denver, CO, USA.
- REBOITA, M., FERNANDEZ, J., PEREIRA LLOPART, M., PORFIRIO DA ROCHA, R., ALBERTANI PAMPUCH, L., & CRUZ, F. (2014). **Assessment of RegCM4.3 over the CORDEX South America domain: sensitivity analysis for physical parameterization schemes.** *Climate Research*, 60, 215–234. DOI: 10.3354/cr01239
- RIAHI, K., GRÜBLER, A., & NAKICENOVIC, N. (2007). **Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization.** *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 887–935.  
<http://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>
- RODRIGUES, W. & MARENGO, J. (2008). **Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario.** *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.1800.
- SAMPAIO, G. (2001). **O El Niño e você. O fenômeno climático.** Editora Transtec. São José dos Campos (SP).
- SANABRIA, J., MARENGO, J., VALVERDE, M., & PAULO, S. (2009). **Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano Departamento de Puno.** *Revista Peruana Geo Atmosférica*, 149(1), 134–149.
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ (SENAMHI) Y ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y AGRICULTURA (FAO). (2010). **Atlas de heladas del Perú** (p. 99).
- SUÁREZ, R. (2012). **La revolución en la toma de decisiones estadísticas: el p-valor.** *Telos*, vol. 14, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 439-446. Universidad Privada Dr. Rafael Bellosillo Chacín Maracaibo, Venezuela.
- TAYLOR, K. E. (2001). **Summarizing multiple aspect of model performance in a single diagram.** *Journal of Geophysical Research*, 106, 7183–7192.  
<http://doi.org/10.1029/2000JD900719>

- TIEDTKE, M. (1989). **A comprehensive mass-flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models.** *Mon Weather Rev* 117: 1779–1800.
- TAYLOR, K. E. (2005). **Taylor Diagram Primer**, (January), 1–4.
- THIBEAULT, J. M., SETH, A., & GARCIA, M. (2010). **Changing climate in the Bolivian Altiplano: CMIP3 projections for temperature and precipitation extremes.** *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, 1–18. DOI: 10.1029/2009JD012718.
- URRUTIA, R. AND VUILLE, M. (2009). **Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century.** *Journal of Geophysical Research*, 114, 1–15. DOI: 10.1029/2008JD011021.
- VALDIVIA, C., THIBEAULT, J., GILLES, J. L., GARCÍA, M., & SETH, A. (2013). **Climate trends and projections for the Andean Altiplano and strategies for adaptation.** *Advances in Geosciences*, 33, 69–77. <http://doi.org/10.5194/adgeo-33-69-2013>
- VUILLE, M., BRADLEY, R. S., WERNER, M., & KEIMIG, F. (2003). **20Th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results.** *Climatic Change*, 59, 75–99. [http://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7\\_5](http://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7_5)
- WAYNE, G. P. (2013). **The Beginner’s guide to Representative Concentration Pathways.** (p. 24).
- ZHANG, XUEBIN, & FENG YANG (2004). **RClimDex (1.0) User Manual.** Climate Research Branch Environment Canada 22.
- ZHENG, B., CHAPMAN, S. C., CHRISTOPHER, J. T., FREDERIKS, T. M., & CHENU, K. (2015). **Frost trends and their estimated impact on yield in the Australian wheatbelt.** *Journal of Experimental Botany*, 66, 3611–3623. <http://doi.org/10.1093/jxb/erv163>

## APÊNDICE

### APÊNDICE A: EQUAÇÕES DAS REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS

Tabela A.1 Equações da regressão linear múltipla das estações meteorológicas

Estação (Zona)	Equação	R <sup>2</sup> Múltiplo
Bambamarca (ZN)	$t=0,83*tmn+556,06*q - 0,65*w - 0,04*u+0,01*v - 1,27$	0,54
Weberbauer (ZN)	$t=0,27*tmn+1225,63*q - 4,29*w - 0,29*u - 0,35*v - 8,52$	0,59
Huamachuco (ZN)	$t=0,36*tmn+693,51*q - 11,49*w - 1,49*u+0,28*v - 4,43$	0,59
Lircay (ZC)	$t=0,31*tmn+481,29*q+5,71*w - 0,34*u - 0,40*v - 0,80$	0,60
Marcapomacocha (ZC)	$t=0,14*tmn+619,92*q - 4,60*w - 0,42*u+0,29*v - 5,23$	0,57
Granja Kcayra (ZS)	$t=0,31*tmn+1432,00*q - 2,67*w - 0,07*u+0,42*v - 10,20$	0,79
Acomayo (ZS)	$t=0,13*tmn+1463,20*q - 0,10*w - 0,01*u+0,60*v - 5,80$	0,75
Ccatca (ZS)	$t=0,27*tmn+946,71*q - 4,57*w + 0,20*u+0,82*v - 8,96$	0,70
Sibayo (ZS)	$t=0,03*tmn+2509,40*q+29,67*w+0,26*u+1,41*v - 14,68$	0,85
Huaraya-Moho (ZS)	$t=0,37*tmn+1111,95*q - 4,92*w + 0,33*u+0,23*v - 6,52$	0,79
Chuquibambilla (ZS)	$t=0,11*tmn+2664,00*q - 12,86*w+0,48*u+0,77*v - 16,3$	0,81
Arapa (ZS)	$t=0,27*tmn+1051,83*q - 4,11*w + 0,26*u+0,36*v - 4,65$	0,75
Mazo Cruz (ZS)	$t=0,31*tmn+1934,64*q+4,93*w - 0,14*u+0,62*v - 16,98$	0,75
La Angostura (ZS)	$t=0,22*tmn+2030,38*q - 5,35*w - 0,43*u+0,44*v - 13,57$	0,81
Imata (ZS)	$t=0,28*tmn+2055,10*q+30,15*w+1,16*u+1,12*v - 18,14$	0,83

ONDE:

t: Temperatura mínima observada na estação meteorológica.

tmn: Temperatura mínima 2 m de altura da Era-Interim.

q: Umidade específica do Era-Interim.

w: velocidade vertical ômega do Era-Interim.

u , v: Componentes zonal e meridional do vento em 500hPa, respectivamente.



APÊNDICE B: SÉRIES TEMPORAIS – AVALIAÇÃO DA REGRESSÃO

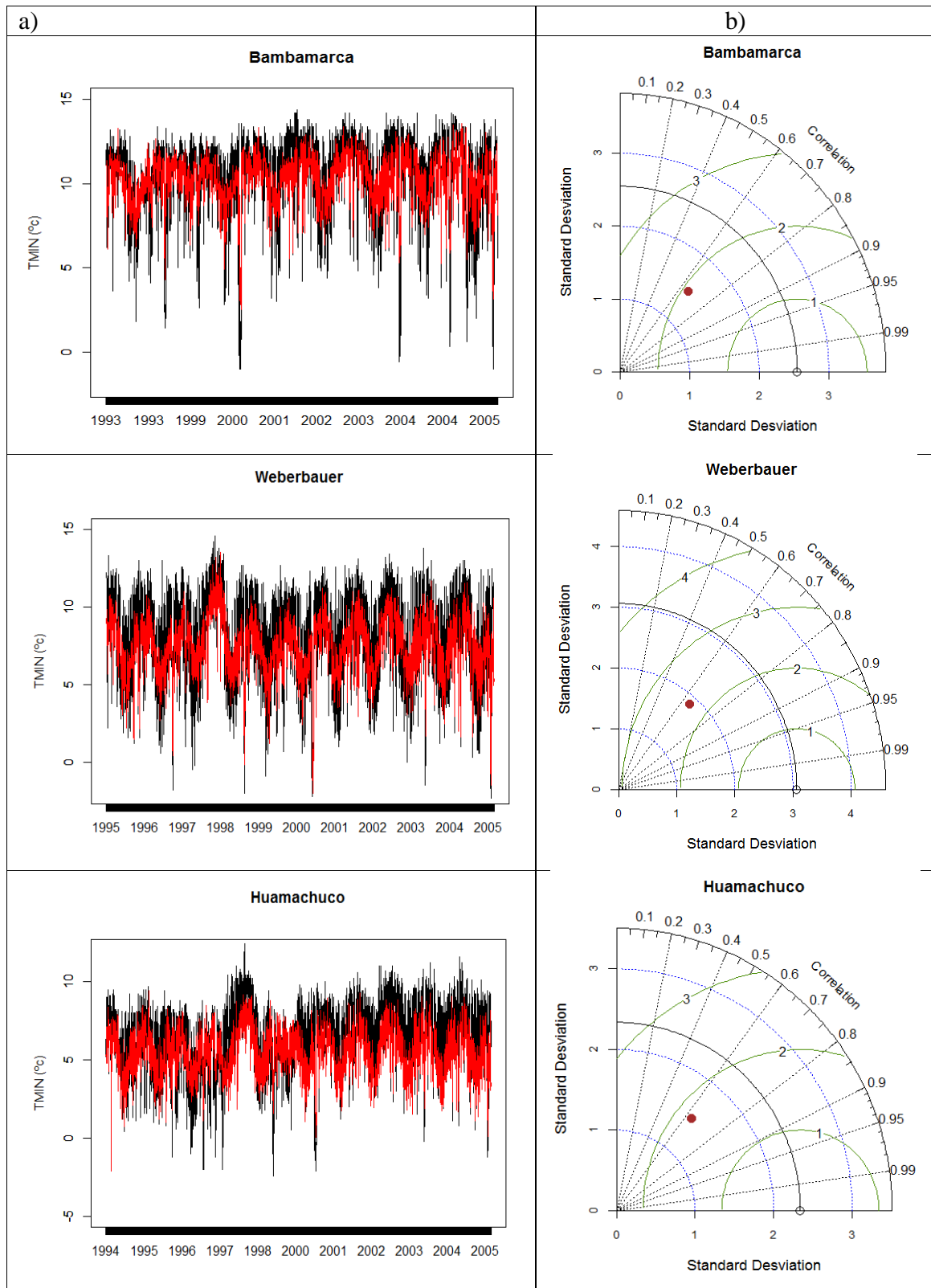


Figura B.1 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZN. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla.

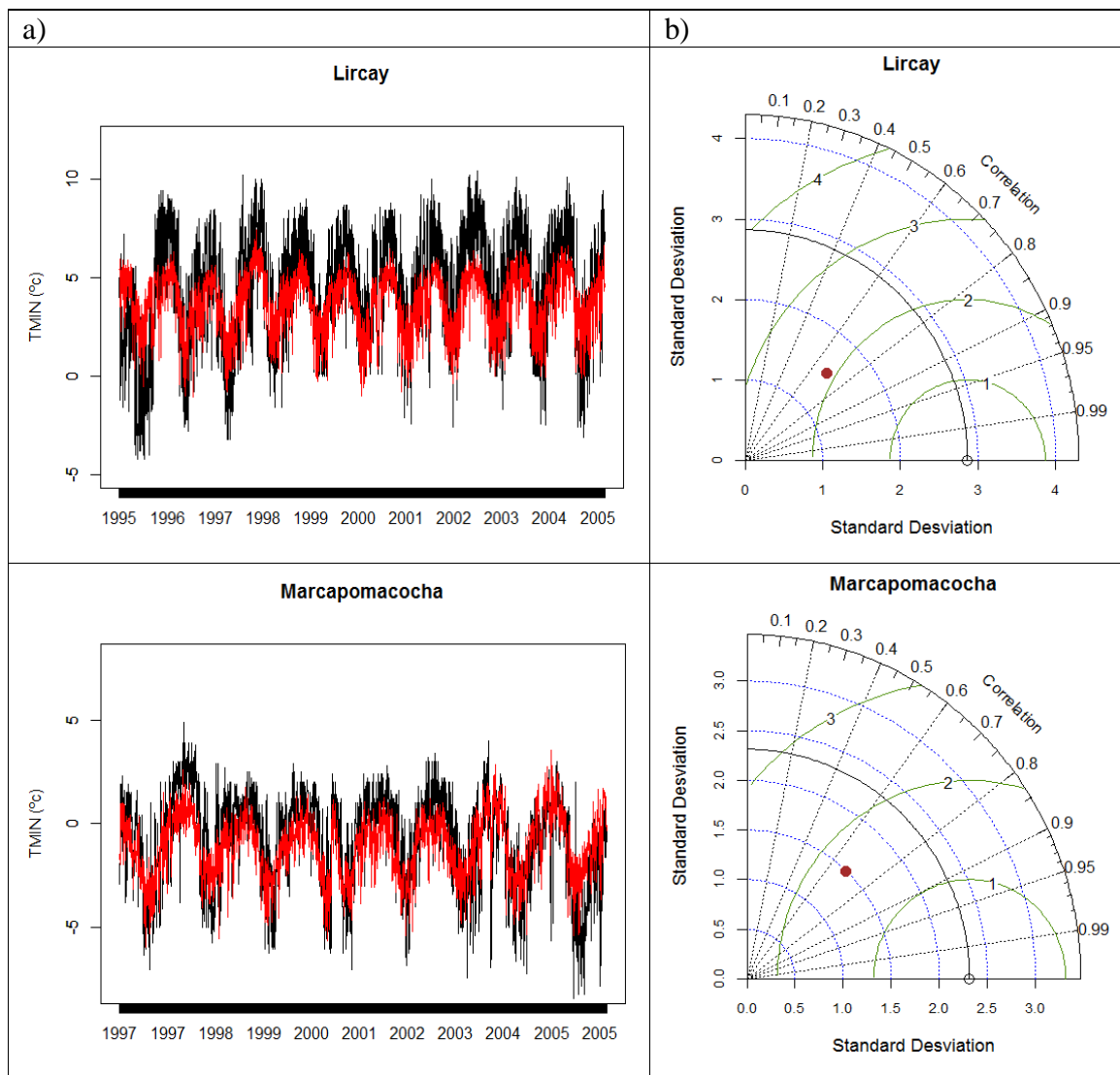


Figura B.2 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZC. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla.

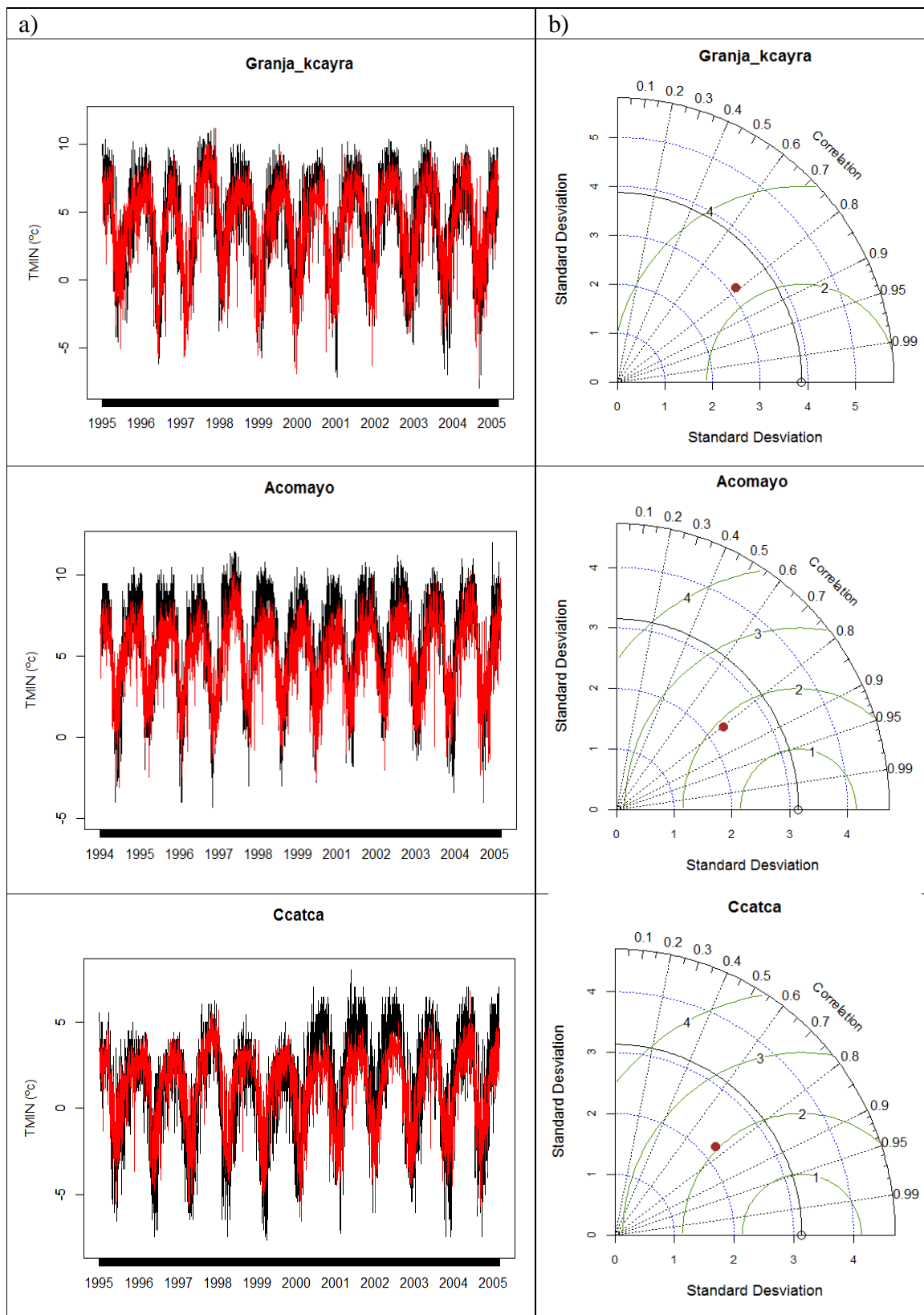


Figura B.3 (a) Série temporal observada (linhas pretas) e série temporal reconstruída com a regressão linear múltipla (linhas vermelhas) de cada estação da ZS. (b) Diagramas de Taylor da regressão linear múltipla.

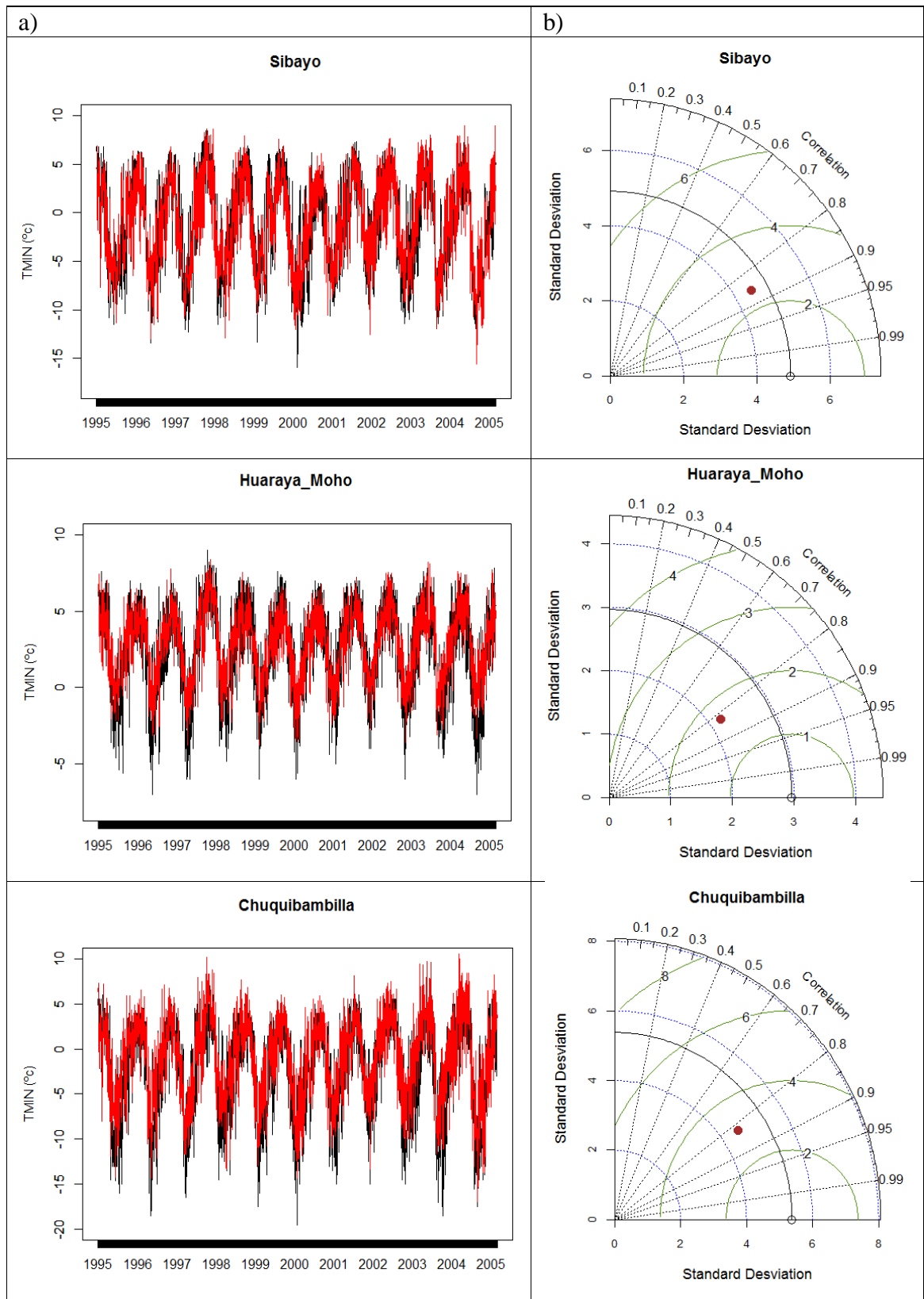


Figura B.3 – Continuação.

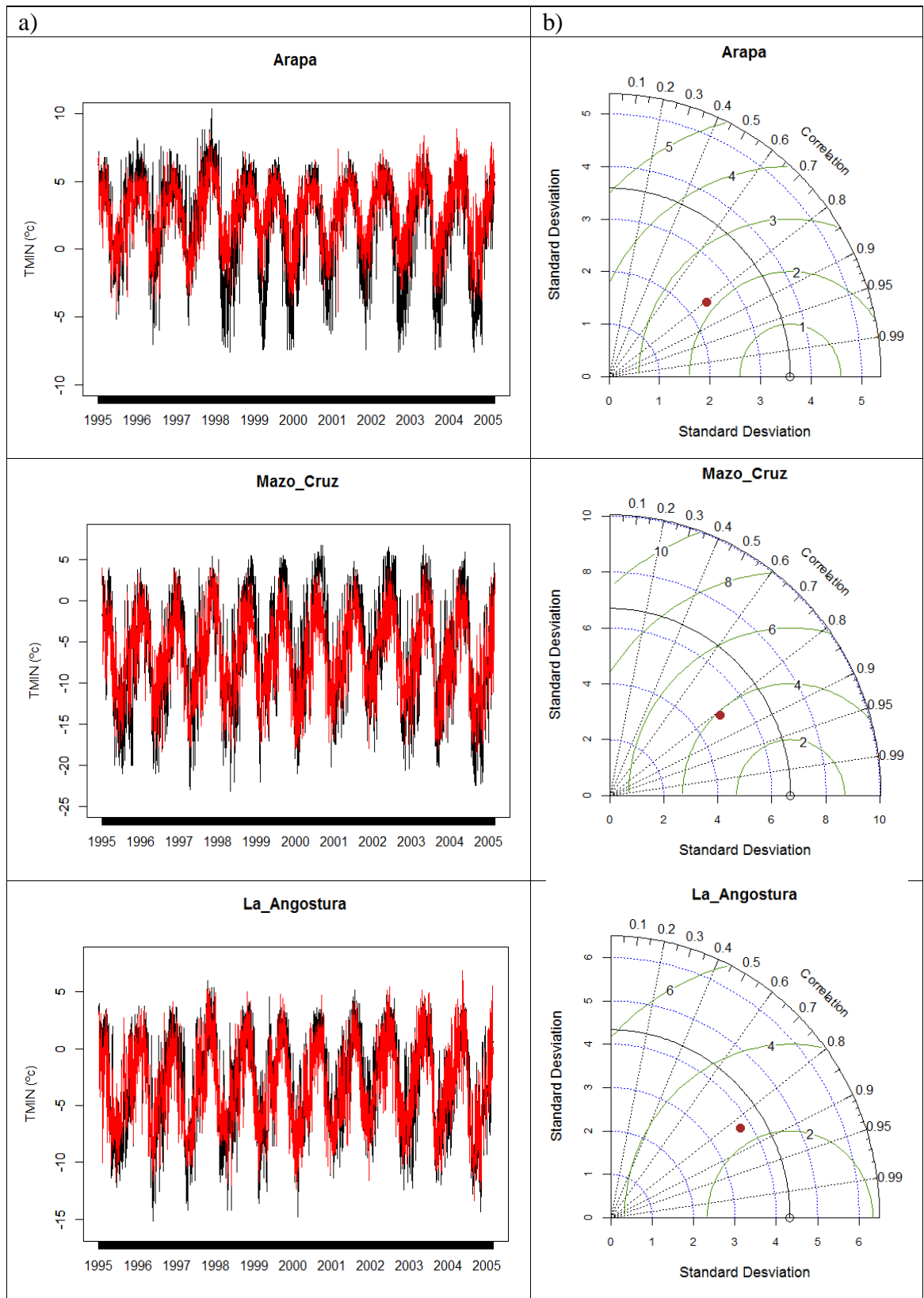


Figura B.3 – Continuação.

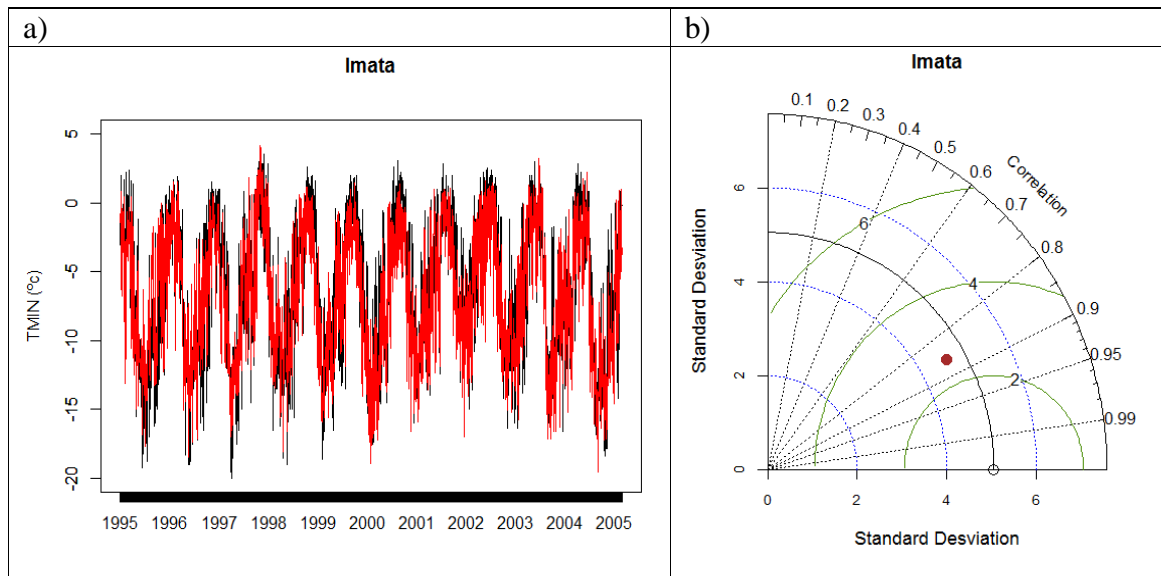


Figura B.3 – Continuação.

## APÊNDICE C: FREQUÊNCIA DE GEADAS SEM O PERFECT PROG NA ZONA NORTE

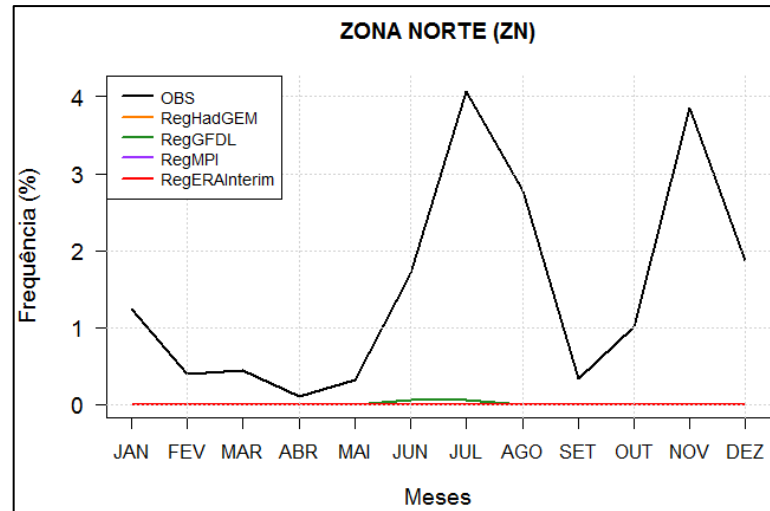


Figura C.4 Ciclo anual da frequência de geadas sem aplicar o perfect prog na ZN para o período 1971 – 2005.