

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

**Erosividade da chuva na América do Sul: comportamento atual e
projeções futuras**

Nelva Bugoni Riquetti

Pelotas, 2019

Nelva Bugoni Riquetti

Erosividade da chuva na América do Sul: comportamento atual e projeções futuras

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R594e Riquetti, Nelva Bugoni

Erosividade da chuva na América do Sul :
comportamento atual e projeções futuras / Nelva Bugoni
Riquetti ; Carlos Rogério de Mello, orientador. — Pelotas,
2019.

148 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação
em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento
Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Fator R. 2. Precipitação. 3. Mapeamento. 4. Mudanças
climáticas. I. Mello, Carlos Rogério de, orient. II. Título.

CDD : 627

Nelva Bugoni Riquetti

Erosividade da chuva na América do Sul: comportamento atual e projeções futuras

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 25/02/2019

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

.....
Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Doutor em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

.....
Prof. Dr. André Becker Nunes
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

.....
Prof. Dr. Samuel Beskow
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Agradecimentos

Ao professor Doutor Carlos Rogério de Mello, pela constante orientação.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

À equipe do Laboratório em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas que contribuíram na realização deste projeto, especialmente ao professor Doutor Samuel Beskow, Maíra Martim de Moura e Jéssica Fernanda Ogassawara.

À professora Doutora Kayla W. Garmus pelo incentivo a seguir meus estudos.
Obrigada.

Resumo

RIQUETTI, Nelva Bugoni. **Erosividade da chuva na América do Sul: comportamento atual e projeções futuras**. 2019. 148f. Projeto de Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

As precipitações intensas e seu potencial erosivo vêm sendo objeto de estudo em escala continental haja vista sua importância para o planejamento do meio ambiente bem como para a agricultura, podendo afetar negativamente a economia e a sociedade de forma significativa. No entanto, o potencial erosivo da chuva, conhecido como erosividade da chuva, e os mecanismos que a controlam, constituem-se de estudos complexos em grande escala, especialmente em regiões com limitação de dados de chuva observados por pluviógrafos. Esta pesquisa tem como objetivo principal o mapeamento do fator R médio anual da Equação Universal de Perda de Solo, versão revisada (RUSLE) para a América do Sul para o tempo presente e ao longo do século XXI, identificando regiões mais vulneráveis considerando sua variabilidade natural. Com base em registros existentes de erosividade das chuvas (EI_{30}) e suas respectivas coordenadas geodésicas, altitude e precipitação média anual para a AS, foi gerado um modelo estatístico para determinar o fator R médio em toda a extensão da AS, empregando o método stepwise para seleção de variáveis de entrada. Para o comportamento atual foi utilizado dados oriundos do WorldClim e para quantificar o comportamento futuro do fator R utilizou-se dados de precipitação média diária com base nas projeções de mudanças climáticas dos MCG HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2 regionalizados pelo modelo Eta/CPTEC para os RCPs 4.5 e 8.5 para o período entre 2010-2099, subdivididos por período (2010-2040; 2041-2070; 2071-2099). O modelo estatístico gerado apresenta bom desempenho com coeficiente de determinação superior a 0,60. Por meio de técnicas disponíveis no software ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014) foi gerado um mapa do fator R subdividido em 18 classes, com resolução espacial de 90m. Assim, foi possível mapear o fator subdividindo em 18 classes, e resolução espacial de 90m, com gradiente espacial do fator R deslocando-se no sentido sudoeste-nordeste. Este mapa apresenta variação entre 50 e 23000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹ para o tempo presente, com baixo potencial erosivo na RAC e elevado na RN, na ordem de 139 e 676 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, sendo reflexo direto da distribuição espacial da precipitação no continente. As projeções do fator R ao longo do século XXI pelas simulações dos MCG apresentam concordância para aumentos expressivos para a RAC (500%), acentuando-se para o RCP8.5; para a RAS, também projeta-se elevação do fator R (290%); para RN há diminuição na ordem de 47% e 83% (RCPs 4.5 e 8.5) para o período 2071-2099; para a RAN e RNE projeta-se tendência de redução na ordem de 56% e 91% (RCPs 4.5 e 8.5; período 2071-2099), no entanto, o modelo Eta-MIROC5 simula elevação do fator R para RAN e RNE (15% e 45%; RCPs 4.5 e 8.5), caracterizando incertezas quanto ao fator R nessas regiões. Finalmente, para a RS e RCS, observou-se maior aumento (até 120%) para o RCP8.5 (período 2071-2099), entretanto para os demais períodos há projeção de redução.

Palavras-chave: fator R; precipitação; mapeamento; mudanças climáticas.

Abstract

RIQUETTI, Nelva Bugoni. **Rain erosivity in South America: current behavior and future projections**. 2019. 148s. Dissertation Project (Master Science in Water Resources) - Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

The intense precipitations and their erosive potential have been studied on a continental scale due to their importance for the planning of the environment as well as for agriculture, which can negatively affect the economy and society in a significant way. However, the erosive potential of rainfall, known as rainfall erosivity, and the mechanisms that control it, are complex studies on a large scale, especially in regions with limited rainfall data observed by rain gauges. This research has as main objective the mapping the annual mean R factor of the Universal Soil Loss Equation, revised version (RUSLE) for South America for the present time and throughout the 21st century, identifying regions that are more vulnerable considering their natural variability based on existing rainfall erosivity records (EI_{30}) and their respective geodesic, altitude and mean annual precipitation for South America, a statistical model was generated to determine the mean R factor throughout the continent, using the stepwise method for selection of input variables. For the current behavior was used WorldClim data for quantify the future behavior of the R factor was used daily average precipitation data based on climate change projections of MCG HadGEM2-ES, MIROC5 and CanESM2 regionalized by Eta/CPTEC model for RCPs 4.5 and 8.5 for the period 2010-2099, subdivided by period (2010-2040; 2041-2070; 2071-2099). The generated statistical model presents good performance with coefficient of determination superior to 0.60. By means of techniques available in ArcGIS software, version 10.1 (ESRI, 2014), a map of the factor R was subdivided into 18 classes, with spatial resolution of 90m. Thus, it was possible to map the subdividing factor R in 18 classes, and spatial resolution of 90m, with spatial gradient of the R factor moving in the southwest-northeast direction. This map presents variation between 50 and 23000 MJ mm (ha h)⁻¹ year⁻¹, for the present time, with low erosive potential in RAC and high in RN, in the order of 139 and 6761 MJ mm (ha h)⁻¹ year⁻¹, being a direct reflection of the spatial distribution of precipitation in the continent. Projections of the factor R throughout the 21st century by simulations of MCG show agreement for significant increases for RAC (500%), accentuating to RCP8.5; for RAS, factor R increase (290%) is also projected; for RN there is a decrease in the order of 47% and 83% (RCP4.5 and 8.5) for the period 2071-2099; for the RAN and RNE, a reduction trend in the order of 56% and 91% (RCPs 4.5 and 8.5, period 2071-2099) is observed, however, the Eta-MIROC5 model simulates R factor elevation for RAN and RNE (15% and 45%, RCPs 4.5 and 8.5), characterizing uncertainties regarding factor R in these regions. Finally, for RS and RCS, a higher increase (up to 120%) was observed for RCP 8.5 (period 2071-2099), however for the other periods there is projection of reduction.

Keywords: R factor; precipitation; mapping; climate change.

Lista de Figuras

- Figura 1: Locais providos com o fator R observado na AS disponíveis na literatura e divisão política continental (a), e regiões geográficas da AS consideradas neste estudo (b).....26
- Figura 2: Mapa de precipitação média anual para a AS desenvolvido com base nos dados do WorldClim (a) e mapa de altitude (b).....27
- Figura 3: Precipitação média anual (mm) para as regiões geográficas da AS (colunas coloridas) para o tempo presente observado (WorldClim) e simulada pelos modelos climáticos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Barras de erro representam o coeficiente de variação.31
- Figura 4: Mapas de precipitação média anual desenvolvidos com base em dados do WorldClim, para o período de 1950-2000 (a), e mapas de precipitação média anual simulados pelos modelos Eta-CaNESM2 (b), Eta-HadGEM2-ES (c) e Eta-MIROC5 (d) para o período de 1961-2005.....32
- Figura 5: Comparação estatística dos mapas gerados com base nos dados do WorldClim e simulados pelos modelos Eta-CaNESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c) para o tempo presente.....35
- Figura 6: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 4.5.37
- Figura 7: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2-ES; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).....37
- Figura 8: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões hidrográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2041-2070 (b). RCP 4.5.38
- Figura 9: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).....39
- Figura 10: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 4.5.39
- Figura 11: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).....40

- Figura 12: Variação consecutiva da precipitação ao longo do tempo (%) para o RPC 4.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). RCP4.5.41
- Figura 13: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 8.5.43
- Figura 14: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).44
- Figura 15: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões hidrográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2041-2070 (b). RCP 8.5.44
- Figura 16: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).46
- Figura 17: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 8.5.46
- Figura 18: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).47
- Figura 19: Variação consecutiva da precipitação ao longo do tempo (%) para o RPC8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).49
- Figura 20: Dispersão dos valores do fator R estimados pelo modelo ajustado ao redor da reta 1:1.50
- Figura 21: Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS obtido a partir das normais climáticas no período de 1961-1990.52
- Figura 22: Fator R médio ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para as regiões geográficas da AS (colunas coloridas) estimado com base nas condições médias atuais de precipitação (WorldClim) e simulado pelos modelos climáticos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 aplicando dados médios simulados de precipitação anual entre 1961 e 2005 (tempo presente). Barras de erro representam o coeficiente de variação e por consequência, a variabilidade das estimativas.56
- Figura 23: Mapa do fator R para a AS (tempo presente) com base nos modelos Eta-CANESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c).57
- Figura 24: Comparação estatística do fator R ao redor da reta 1:1, estimados pelos modelos Eta-CaNESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c) para o tempo presente em função ao fator R WorldClim.58

- Figura 25: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulado pelos modelos com base nos modelos climáticos para as regiões da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 4.5.....59
- Figura 26: Mapas do fator R para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).60
- Figura 27: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos climáticos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente para o período 2041-2070 cenário RCP 4.5 (b).61
- Figura 28: Mapas do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2041-2070 e cenário RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).62
- Figura 29: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 4.5.....63
- Figura 30: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).....64
- Figura 31: Variação consecutiva do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do tempo (%) para o RPC4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).65
- Figura 32: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período de 2010-2040 (b). RCP 8.5.67
- Figura 33: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo de 2010-2040, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).68
- Figura 34: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulado pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período de tempo 2041-2070 (b). RCP 8.5.....69
- Figura 35: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2041-2070, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).71
- Figura 36: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o tempo presente 2071-2099 (b). RCP 8.5.71
- Figura 37: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2071-2099, RCP 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).....73

Figura 38: Variação consecutiva do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do tempo (%) para o RPC 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).
.....74

Lista de Tabelas

Tabela 1: Estimativa dos parâmetros do modelo para o fator R e suas características estatísticas.	50
Tabela 2: Média do fator R por Região Geográfica na AS.	53
Tabela 3: Média anual do fator R por país na AS.....	53
Tabela 4: Variação da Precipitação e fator R (%) representando os valores médios nas Regiões Geográficas da AS para os modelos globais (RCP 4.5 e 8.5) para o século XXI.	77

Sumário

1 Introdução	15
2 Revisão da Literatura	18
2.1 Mudanças climáticas.....	18
2.2 Sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul.....	19
2.2 Caracterização e estimativa da erosividade da chuva.....	21
3 Material e Métodos.....	24
3.1 Aspectos gerais da precipitação na América do Sul.....	24
3.2 Base de dados para modelagem do fator R na América do Sul	25
3.4 Impactos das mudanças climáticas sobre o fator R na América do Sul ...	28
4 Resultados e Discussão.....	31
4.1 Análise de desempenho dos modelos climáticos globais (MCG) na AS: comportamento da precipitação média anual para o tempo presente.....	31
4.2 Projeção da precipitação média anual ao longo do século XXI pelos modelos climáticos globais para AS.....	36
4.2.1 RCP 4.5	36
4.2.2 RCP 8.5	42
4.3 Modelagem do fator R para a América do Sul.....	50
4.4 Análise de desempenho dos modelos climáticos globais na estimativa do fator R	56
4.5 Projeção do fator R ao longo do século XXI para AS.....	59
4.5.1 RCP 4.5	59
4.5.2 RCP8.5	67
5 Considerações Finais.....	81
Referências	83
Apêndice	96

1 Introdução

A degradação do solo é um dos principais problemas ambientais da atualidade, e pode ser originada por causas naturais, tendo o clima como principal agente, e também por causas antrópicas. Dentre essas, destaca-se a vulnerabilidade do solo às erosões hídrica e eólica, sendo a primeira, acelerada globalmente devido às atividades antrópicas, especialmente práticas agrícolas inadequadas e o desmatamento, e eventos extremos de chuva (BORK; LANG, 2003; NACHTERGAELE et al., 2009).

A erosão acelerada do solo é um processo que desencadeia a degradação da terra na forma de perda de nutrientes, levando a uma diminuição da produtividade do solo (YANG et al., 2003). Para uma agricultura sustentável, a erosão do solo é uma ameaça, com efeitos acentuados pelas mudanças climáticas e pelo aumento populacional nas últimas décadas (UNCCD, 2012). O aumento da temperatura, notadamente como consequência das ações antrópicas, principalmente pela emissão de gases de efeito estufa, tem provocado impactos profundos na dinâmica do clima, tais como extremos de temperatura, precipitações intensas, desertificação de regiões tropicais, dentre outros.

A erosão causada pela ação climática tem sido tratada como um dos grandes problemas ambientais em escala mundial, principalmente em terras agrícolas em regiões tropicais e subtropicais. A chuva é o agente ativo da erosão hídrica, sendo essa uma das mais impactantes para o solo em decorrência do potencial de desagregação de suas partículas pelo impacto de gotas num processo conhecido como salpicamento. Esse potencial erosivo da chuva é conhecido como erosividade (Wischmeier e Smith, 1978) e é fundamental para subsidiar ações de planejamento integrado visando à mitigação da erosão do solo com base em modelos mais simples, tais como a Equação Universal de Perda de Solos (USLE) e sua versão revisada (RUSLE) (MELLO et al., 2013).

Conceitualmente, entende-se por erosividade a capacidade das chuvas em provocar erosão do solo e depende de suas características físicas, tais como a energia cinética das gotas (tamanho de gotas e de sua velocidade terminal), bem como pela intensidade máxima da chuva em 30 minutos consecutivos (Wischmeier e Smith, 1978). A erosividade atua na primeira fase do ciclo hidrossedimentológico, ou seja, na

desagregação de partículas do solo pelo impacto direto de gotas. Com isso, o conhecimento e a quantificação das causas que influenciam no processo erosivo são fundamentais para o planejamento e manejo do solo em uma determinada região (CARVALHO et al., 2005).

Os principais fatores que determinam a perda média anual de solo por erosão hídrica são a erosividade média da chuva (fator R), a erodibilidade do solo, uso e manejo do solo, práticas de conservação e as condições topográficas. Dentre estes, o fator R é um dos parâmetros físicos mais importantes associados aos processos erosivos, sendo assim, propor medidas de conservação utilizando modelos para previsão da erosão do solo é extremamente útil para o planejamento ambiental. Como a erosão do solo é de difícil medição em grandes escalas, são necessários modelos que permitam inferir sobre esta em escalas regional, nacional e continental (PANAGOS et al., 2017).

Modelos para previsão em grande escala são estratégicos visto que a erosão do solo ocorre primordialmente pelo impacto das gotas de chuva sobre o solo, levando a um processo de selamento superficial, com redução da taxa de infiltração de água no solo e aumento do escoamento superficial direto, constituindo-se em uma ameaça à sustentabilidade do solo e, por conseguinte, a uma economia sustentável.

Com o avanço dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) combinados com tecnologias de sensoriamento remoto, tornou-se possível o uso da USLE e da RUSLE em escala de grandes bacias hidrográficas para simular o impacto de mudanças de uso da terra sobre a erosão do solo (BESKOW et al. 2009). Portanto, surge a necessidade de se desenvolver métodos alternativos para mapear o fator R como função de variáveis geográficas combinados com variáveis ambientais secundárias que são de fácil obtenção para locais com escassez de dados oriundos de pluviogramas (MELLO et al., 2015; MELLO et al. 2013).

Como descrito, a modelagem em grande escala torna-se uma tarefa difícil e complexa em decorrência especialmente da baixa densidade de postos pluviométricos, caso este, da América do Sul (AS), com especial atenção na Cordilheira dos Andes com escassos dados de precipitação. Outro fator que condiciona a modelagem são as características geomorfológicas, centrando-se especialmente na heterogeneidade do clima e relevo. Assim, a AS pode ser dividida em regiões tropical, temperada, seca e fria, distribuídas seguindo a topografia da região. Deste modo, chuvas são abundantes em grande parte da AS, com exceção

das áreas desérticas norte do Chile (deserto do Atacama) e do Peru, Patagônia argentina e nordeste brasileiro. Essas particularidades apresentadas condicionam a modelagem do fator R na AS.

Além disso, a análise dos impactos futuros de mudanças climáticas sobre o comportamento da precipitação, afetando inclusive seu padrão espacial e temporal e estudos associados à estimativa futura desta, são indispensáveis e poucos são os estudos conduzidos nessa linha na América Latina. Neste sentido, o objetivo geral deste estudo é mapear o fator R para a América do Sul para o tempo presente e para o tempo futuro, a fim de melhorar a compreensão sobre o padrão espacial da erosividade das chuvas em nível continental. Como objetivos específicos, destacam-se:

- a) Desenvolver um mapa do fator R para a América do Sul com base nos dados existentes atualmente;
- b) Desenvolver um modelo geográfico para o fator R para a AS e a partir deste, mapas do fator R simulados com base nos modelos climáticos globais HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, regionalizados pelo modelo Eta/CPTEC, com resolução espacial de 20km, para o tempo presente e compará-los ao mapa atual (letra a), avaliando o desempenho dos modelos climáticos;
- c) Identificar as potencialidades dos modelos climáticos globais em simular o fator R e suas limitações em simular os fenômenos climáticos que afetam a América do Sul;
- d) Analisar os impactos das mudanças climáticas futuras sobre o fator R para a América do Sul.

2 Revisão da Literatura

2.1 Mudanças climáticas

O Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC, 2007), afirma que a causa principal do aquecimento global se deve às atividades antrópicas (probabilidade de 90%) nos últimos 50 anos devido principalmente à mudança da composição da atmosfera pelos gases de efeito estufa (GEE), destacando-se o dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso como principais responsáveis. O relatório destaca como mudanças climáticas o aumento de temperatura do ar e dos oceanos, degelo de neve e gelo e aumento global do nível médio do mar de 17cm durante o século XX. Também são mencionados a intensificação de alguns tipos de fenômenos meteorológicos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas, secas e ciclones tropicais em várias partes do globo no período de 1995 a 2006. O relatório projeta que a temperatura média global pode seguir aumentando de 2°C a $\geq 4^\circ\text{C}$ na ausência de mitigação e elevação do nível do mar entre 28 a 59cm, podendo superar 1m até o final do século XXI.

O Quinto Relatório (IPCC, 2013) reafirma que o aquecimento do sistema climático é inequívoco e, para as mudanças climáticas mencionadas no AR₄, há aumento sem precedentes na concentração do GEE e da temperatura média global da superfície com tendência a seguir aumentando até o final do século XXI, e como aproximadamente 30% das emissões de CO₂ têm sido absorvidas pelo oceano, causando sua acidificação. Assim, é extremamente provável que a influência das atividades antrópicas tenha sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX (probabilidade 95% a 100%). Eventos de precipitação extrema sobre a maior parte das massas de terra das latitudes médias e regiões tropicais úmidas apresentam alta probabilidade (90% a 100%) de se tornarem mais intensos e mais frequentes no final deste século, à medida que a temperatura média global seguirá aumentando, assim também o oceano continuará a se aquecer e o nível médio do mar a subir em termos globais durante o século XXI.

Estudos conduzidos por Torres e Marengo (2013), através de projeções de temperatura e precipitação sazonal para períodos entre 2041 a 2100 indicam para AS

aumento de temperatura que excede a 2°C (probabilidade superior a 90%) para todas as estações, em toda a região do continente. Assim, há probabilidade de não exceder a 4°C é encontrado sobre o noroeste da América do Sul, a Bacia Amazônica, Bolívia, Peru e Nordeste Brasileiro de junho a novembro até final do século XXI, podendo experimentar aumento do estresse hídrico por aumento da temperatura global (superiores a 2 e 4°C) que a média. No Brasil, a região amazônica e a região nordeste apresentam-se mais vulneráveis às mudanças climáticas, especialmente quanto aos extremos climáticos (MARENGO, 2007; MARENGO et al., 2007).

2.2 Sistemas atmosféricos atuantes na América do Sul

A ameaça associada à vida humana e às atividades socioeconômicas e outras grandes perturbações sociais justificam uma compreensão mais profunda das dinâmicas hidrológicas associadas às chuvas extremas e seu poder erosivo, assim como sua variabilidade no tempo e espaço (NEW et al., 2007). A ocorrência de chuvas de grande intensidade constitui um perigo natural para erosão do solo, características da região equatorial (ao norte da região Amazônica). Compreender as características das chuvas convectivas, caracterizadas por sua extensão vertical e horizontal torna-se primordial para identificação dos processos que contribuem para climas extremos e chuvas erosivas na América do Sul (GARSTANG et al., 1994; ROMATSCHKE e HOUZE, 2010).

A América do Sul apresenta alguns dos sistemas convectivos mais extremos e intensos do planeta Terra. Desta forma, este continente desempenha um papel dominante na dinâmica da circulação atmosférica global através do aquecimento radiativo e latente (BAKER et al., 2001). Zipser et al. (2006) apontam que alguns dos sistemas convectivos mais intensos da Terra ocorrem no Centro-Oeste da Argentina, (perto da Cordilheira dos Andes), ameaçando a produção vinícola da região. Outro sistema atuante na AS descrito por Berry e Inzunza (1993); Seluchi e Marengo, (2002); Vera et al., (2006a); Salio et al., (2007); entre outros estudos é conhecido como Jato de Baixos Níveis (JBN), caracterizando-se como uma estreita zona de ventos máximos gerado pelo ciclo diário de convergência e divergência a leste da Cordilheira dos Andes (região central da AS) que transporta umidade da bacia amazônica para as regiões produtivas agrícolas do sul do Brasil e norte da Argentina durante a estação

quente e úmida, propiciando a formação de atividades convectivas generalizadas na região.

Os estudos de Garstang et al. (1994), Reboita et al. (2010) e outros, indicam que algumas das maiores linhas de turbulência do mundo ocorrem sobre a região amazônica, sendo uma das fontes de vapor d'água mais importantes para a precipitação abrangendo grande extensão da América do Sul. De Norte a Leste da América do Sul é formada uma faixa de umidade conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que combinada com sistemas frontais oriundos do sul do continente, gera os eventos pluviométricos mais relevantes durante o verão no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e, conseqüentemente, com alto potencial erosivo das chuvas (MELLO et al., 2013, 2015; CARVALHO, et al., 2004).

Estudos anteriores de chuva convectiva sobre a América do Sul destacaram a importância de certos padrões de fluxo em larga escala (VERA et al., 2006b). Na região tropical ao norte da América do Sul, onde os ventos de leste para oeste em grande escala geram linhas de instabilidade, assim como Jatos de Baixos Níveis que se estende para o Sul, a leste dos Andes contribuem para eventos convectivos severos. Essas forçantes sinóticas devem ser consideradas para entender o padrão das precipitações extremas sobre a América do Sul (ROMATSCHKE e HOUZE, 2010).

O clima da América do Sul mostra padrões complexos de variabilidade espacial e temporal, o que é agravado pela previsibilidade inerente à erosividade interanual das chuvas em decorrência da quantidade de precipitação pluvial. Como exemplo, no Brasil, os maiores valores do fator R são causados por precipitações intensas ocorridas especialmente no período chuvoso (outubro-março) (MELLO et al., 2013). Eventos climáticos, como tempestades e secas, podem ser agrupados em eventos de curto prazo, fazendo alguns anos tempestuosos serem encobertos por períodos secos (ESPINOZA et al., 2011; MARENGO et al., 2011). Isso denota que seus impactos podem não variar unicamente em relação ao tamanho da série, dificultando deste modo qualquer relação entre magnitude e frequência (DIODATO; BELLOCCHI, 2010b). A variabilidade climática é apresentada como uma das principais causas desses agrupamentos. A resposta média global de precipitação às mudanças climáticas pode variar expressivamente em prazos de 20 anos em decorrência da variabilidade climática interna (LIEPERT; PREVIDI, 2009; PREVIDI; LIEPERT, 2008).

2.2 Caracterização e estimativa da erosividade da chuva

Um enfoque alternativo para estimar a erosão baseia-se no uso de modelos de erosão do solo. Um dos modelos mais utilizados para estimar a erosão média anual do solo em grande escala é a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), baseada em processos semi-empíricos (RENARD et al., 1997). Este modelo deriva do modelo original Universal Soil Loss Equation (USLE), desenvolvido pelo USDA/ARS (United States Department of Agriculture/Agricultural Research Service dos EUA) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), que se baseia em um conjunto de experimentos sobre perda de solos em decorrência da erosão hídrica em parcelas agrícolas nos Estados Unidos. O modelo RUSLE prediz as taxas médias de erosão do solo através do produto da erosividade média da chuva (fator R), um fator de declive (S), um fator de comprimento de rampa (L), um fator de erodibilidade do solo (K), um fator de uso e manejo do solo (C) e um fator de práticas conservacionistas (P) (NAIPAL et al., 2015). Doetterl et al. (2012) mostraram que os fatores L e S, juntamente com o fator R, podem explicar até 75% da variabilidade da erosão em áreas agrícolas em escala de bacia hidrográfica, uma vez que esses fatores desencadeiam o processo da erosão do solo.

A energia cinética total da chuva e a sua intensidade máxima em 30 minutos são os parâmetros pluviométricos que melhor se correlacionam com as perdas de solo por erosão hídrica (WISCHMEIER, 1959). O EI_{30} tem sido um índice amplamente utilizado como “proxy” de precipitação intensa, proporcionando uma boa correlação com a perda de solo em vários estudos no Brasil (BERTOL et al., 2007, 2008; SILVA et al., 2009). O índice EI_{30} é calculado com base na intensidade máxima em 30 minutos consecutivos (I_{30}) e a energia cinética de chuva (E_c) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), a qual depende da intensidade média e do total de chuva. No entanto, é recomendável uma série histórica com pelo menos 15 anos de dados (Nearing et al. 2017) para calcular esse fator, com objetivo de abranger variações periódicas comuns aos parâmetros climáticos, permitindo sua aplicação incorporada ao modelo RUSLE e, neste caso, é conhecido como fator R.

Não obstante, séries temporais longas o suficiente não são encontradas em muitas partes do mundo, principalmente em países da América do Sul, mesmo no Brasil, que tem um maior número destes estudos (CAPOLONGO et al., 2008; HOYOS et al., 2005; LEE; HEO, 2011; MELLO et al., 2013). Assim, métodos simplificados para estimar o fator R que usam dados disponíveis têm sido apresentados e utilizados em

muitos países devido à indisponibilidade para muitos locais de dados de precipitação com registros de alta resolução temporal, necessários para computar diretamente a erosividade da chuva ($I_{30} \times Ec$). Além disso, os cálculos usando tais dados (quando disponíveis) são complexos e demorados (LEE; HEO, 2011).

O fator R é um valor numérico, em $(MJ \text{ mm } (ha \text{ h})^{-1} \text{ ano}^{-1})$, que representa o potencial da chuva e da enxurrada a ela associada para quantificar a erosão hídrica. É determinado computando a soma dos valores de EI_{30} de cada evento de chuva ao longo do ano, e caracterizando-se, a partir de vários anos de coleta, seu valor médio anual (BROWN; FOSTER, 1987; WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A estimativa do fator R permanece, no entanto, uma tarefa difícil em áreas onde a variabilidade espacial e temporal das variáveis climáticas é alta (DIODATO; BELLOCCHI, 2010a). Também em áreas onde séries temporais de longo prazo estão disponíveis, o número de locais na maioria das vezes é insuficiente para extrapolar de forma adequada para as escalas espacial e temporal requeridas (DAVISON et al., 2005). Para superar a escassez das estações pluviográficas, foram propostos modelos que relacionam a erosividade média com dados geográficos e pluviométricos (por exemplo, precipitação mensal, precipitação total anual, Índice Modificado de Fournier). Os registros pluviométricos diários estão geralmente disponíveis para a maioria dos locais com boa cobertura espacial e temporal, permitindo a estimativa da erosividade em regiões que não possuem dados pluviográficos (ANGULO-MARTÍNEZ; BEGUERÍA, 2009; MELLO et al., 2013; SILVA, 2004).

Mello et al. (2013), analisando os trabalhos pertinentes à erosividade da chuva no Brasil, encontraram 54 equações para o fator R ajustadas com base em dados pluviográficos como função do Modified Fournier Index (MFI), Fournier Index (FI) ou das precipitações médias mensais e anual. Assim, os autores desenvolveram modelos geográficos com base em regressão linear múltipla para estimar a erosividade média anual para qualquer localidade no Brasil utilizando somente suas coordenadas geográficas e altitude.

Mapas do fator R vêm sendo aplicados para análises relacionadas à distribuição espacial da erosão hídrica em bacias hidrográficas. Um enfoque comum é a aplicação da RUSLE, principalmente para regiões com escassez de registros pluviográficos, aplicando técnicas de mapeamento e interpolação disponíveis em SIG (BESKOW et al., 2009; SHAMSHAD et al., 2008). Neste contexto, a erosividade da chuva vem sendo estudada em diversos países há várias décadas. Como estudos

pioneiros pode-se destacar aqueles realizados nos Estados Unidos, demonstrando a importância em estimar a perda de solo causada por vários fatores, incluindo o poder erosivo das chuvas (SMITH, 1941; WISCHMEIER, 1959, 1960; WISCHMEIER e SMITH 1965, 1978; RENARD et al., 1997).

Silva (2004) investigou a distribuição espacial da erosividade anual das chuvas no Brasil, dividindo o território em regiões com os maiores valores anuais encontrados no extremo noroeste e os menores na região nordeste do país. Mello et al. (2013; 2015) pesquisaram a distribuição do fator R no Brasil, desenvolvendo e testando vários modelos, baseado na análise multivariada, demonstrando ser possível utilizar somente as coordenadas geográficas e altitude, combinado com o uso de métodos de interpolação, para gerar mapas de alta confiabilidade. Hoyos et al. (2005) investigaram o potencial erosivo das chuvas na região central cafeeira da Colômbia, ressaltando a sazonalidade na flutuação dos resultados. Rojas e Conde (1985) estudaram o potencial erosivo da chuva nas principais províncias produtoras de grãos na Argentina e geraram mapas isoerodentes (linhas com igual potencial erosivo). Na região central do Chile, visando subsidiar o manejo adequado do solo, Bonilla e Vidal (2011) ressaltam a influência da altitude e latitude de norte a sul na variabilidade do fator R ao longo da área de estudo.

3 Material e Métodos

3.1 Aspectos gerais da precipitação na América do Sul

Este estudo contempla a AS, sendo uma área continental com latitudes variando de 15° N a 60°S e longitudes de 35°W a aproximadamente 80°W e altitude de 0 a 6000m, cobrindo uma área de aproximadamente 17.840.000km². Segundo Reboita et al. (2010), os regimes de precipitação na América do Sul são classificados baseados na atuação dos diferentes sistemas meteorológicos:

- a) Eventos convectivos com máximos de precipitação no verão e mínimas no inverno, localizados em latitudes tropicais e subtropicais;
- b) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que atua nas regiões Norte e Nordeste do Brasil;
- c) Frentes frias, afetando a regiões Sul e Sudeste do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, combinadas a Ciclones Extratropicais e Tropicais;
- d) Zona de Convergência do Atlântico Sul, que consiste de um canal de umidade com origem na região amazônica e que afeta tanto o Centro-Oeste quanto o Sudeste do Brasil, especialmente em latitudes menores que 20°S (FERREIRA et al. 2004; ESCOBAR et al., 2016)
- e) Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que consiste de um sistema de alta pressão que atua a leste do continente entre as latitudes de 15 a 30°S, impedindo a formação de chuvas convectivas bem como o deslocamento de frentes frias sobre a região do Sudeste do Brasil; com isso, pode haver aumento da concentração de chuvas sobre a região sul do Brasil, Uruguai e Argentina;
- f) Anticiclone subtropical do Pacífico Sul (ASPS) atuando no Sudoeste da AS, entre 25°S a 90°W, consiste em um centro de alta pressão semipermanente que deve sua existência ao movimento subsidente da célula de Hadley que condiciona as taxas de precipitação ao longo do ano. Assim o ASPS influencia a ocorrência de baixas taxas de precipitação na região ao Norte do Chile (deserto do Atacama) e Centro-Norte da Argentina.
- g) Frentes Frias (FF) combinados com Ciclones Extratropicais atuam no Centro-Sul do Chile e Extremo Oeste do Centro-Sul da Argentina, assim em

decorrência a não influência do ASPS (especialmente ao Sul do continente) mantem-se as taxas de precipitação homogênea ao longo do ano.

Em decorrência dessa complexidade climática no continente sul-americano, Peel et al. (2007) identificaram os principais tipos climáticos de Köppen: A, B, C e E, sendo territorialmente dominante o tipo A (Tropical) com 60,1%, abrangendo latitudes entre 22°S e 10°N, seguido pelo tipo C (Temperado), que se estende do Norte da Argentina, passando pela região ocidental do Paraguai, nas partes mais elevadas do Sudeste do Brasil e no Sul do Brasil, cobrindo 24,1% da área; e B (Árido) com 15,0%, alcançando parte da Argentina, Costa do Chile, Peru, parte da Bolívia, e Nordeste do Brasil; em menor área está o tipo E (Polar), com apenas 0,8% de extensão, ocorrendo nas partes mais elevadas dos Andes, ao longo do extremo sul do Chile (Estreito de Magalhães)/Argentina (Terra do Fogo) e nas Ilhas Malvinas e Geórgia do Sul.

3.2 Base de dados para modelagem do fator R na América do Sul

Os dados compilados derivam de uma ampla pesquisa representando os gradientes geográficos e climáticos ressaltando a deficiência de dados em algumas regiões. Foi possível obter dados do Brasil, Paraguai, Chile, Uruguai, Argentina, Colômbia, Venezuela, Equador, Peru e Bolívia. Na Figura 1 estão apresentados os locais para os quais foram obtidas informações associados ao fator R, bem como a delimitação geográfica da América do Sul adotada neste estudo, a saber: região dos Andes Sul (RAS), região dos Andes Central (RAC), região dos Andes Norte (RAN), região Sul (RS), região Centro-Sul (RCS), região Nordeste (RNE) e região Norte (RN). Foi possível criar um banco de dados com as informações referentes a localização, fator R, precipitação média, altitude e período de coleta dos dados e /ou anos totalizando 201 pontos nos diferentes países da AS (Apêndice A). Cabe destacar que para a delimitação das regiões geográficas foi utilizado a Base Hidrográfica Ottocodificada (níveis Otto) disponibilizado pela Agencia Nacional de Águas (ANA) através do Portal de Metadados Geoespaciais (ANA, 2018). As mesmas foram delimitadas em função ao primeiro e segundo nível da codificação de Otto Pfafstetter (formato shapefile), na sequência foi adaptado a uma divisão de sete regiões para

melhor atender as necessidades deste estudo utilizando como critério as semelhanças nos regimes pluviométricos e gradiente topográficos da AS.

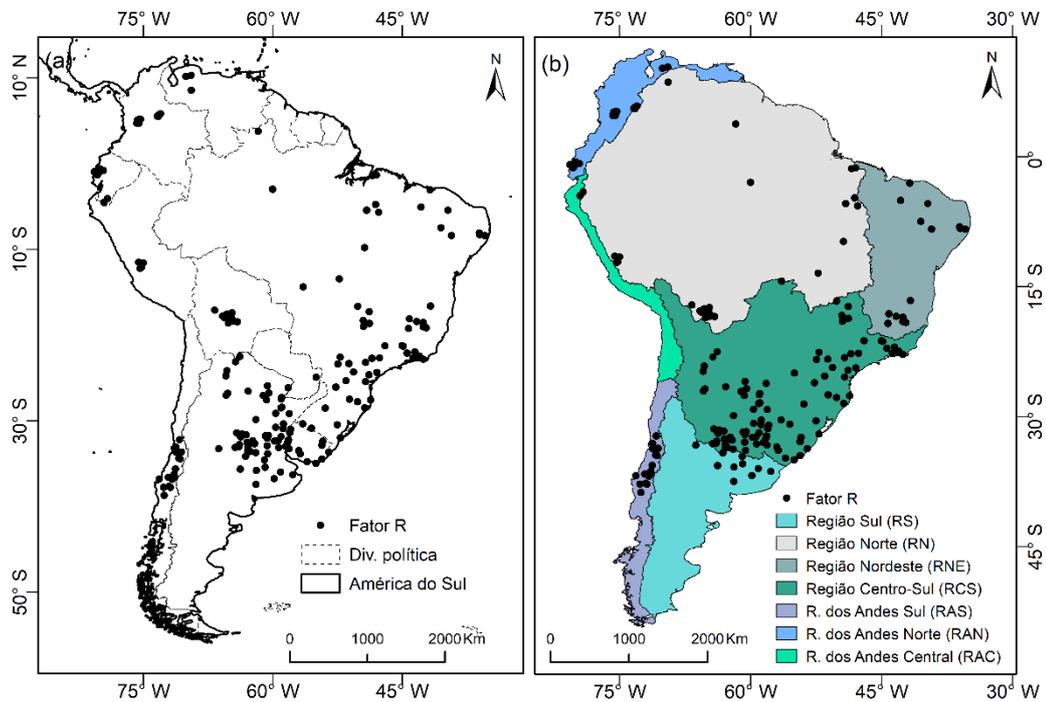


Figura 1: Locais providos com o fator R observado na AS disponíveis na literatura e divisão política continental (a), e regiões geográficas da AS consideradas neste estudo (b).

Foram utilizados também dados de precipitação média anual, altitude, latitude e longitude extraídos da base de dados “WorldClim Global Climate Data”, disponível em <http://www.worldclim.org/> em formato Geotiff (Float Point 32 Bits). Conforme Hijmans et al. (2005), a base de dados WorldClim é um conjunto de covariáveis climáticas globais, tais como precipitação, temperatura e variáveis bioclimáticas com resolução espacial de 1km, que representam condições de longo prazo. Essa base de dados é formada por dados climáticos mensais médios coletados de inúmeras estações meteorológicas de superfície em todo o mundo durante o período 1950-2000, contendo as normais climatológicas para período de 1961-1990 com base em dados observados. Cabe destacar que as camadas de dados do “WorldClim Global Climate Data” foram geradas através da interpolação (pacote do software ANUSPLIN versão 4.3) usando dados climáticos mensais médios de estações meteorológicas em uma grade de resolução de 30 arco de segundos (aproximadamente resolução espacial de 1km²), dados de elevação e coordenadas geodésicas referenciadas ao datum WGS84. As variáveis incluídas são precipitação total mensal e média mensal, temperatura mínima e máxima e 19 variáveis bioclimáticas derivadas. Para maiores

informações referentes a metodologia adotada no WorldClim Global Climate Data, assim como a distribuição dos postos pluviográficos utilizados na AS estão disponíveis em Hijmans et al. (2005).

Na Figura 2 observa-se os mapas de precipitação média anual e altitude da AS.

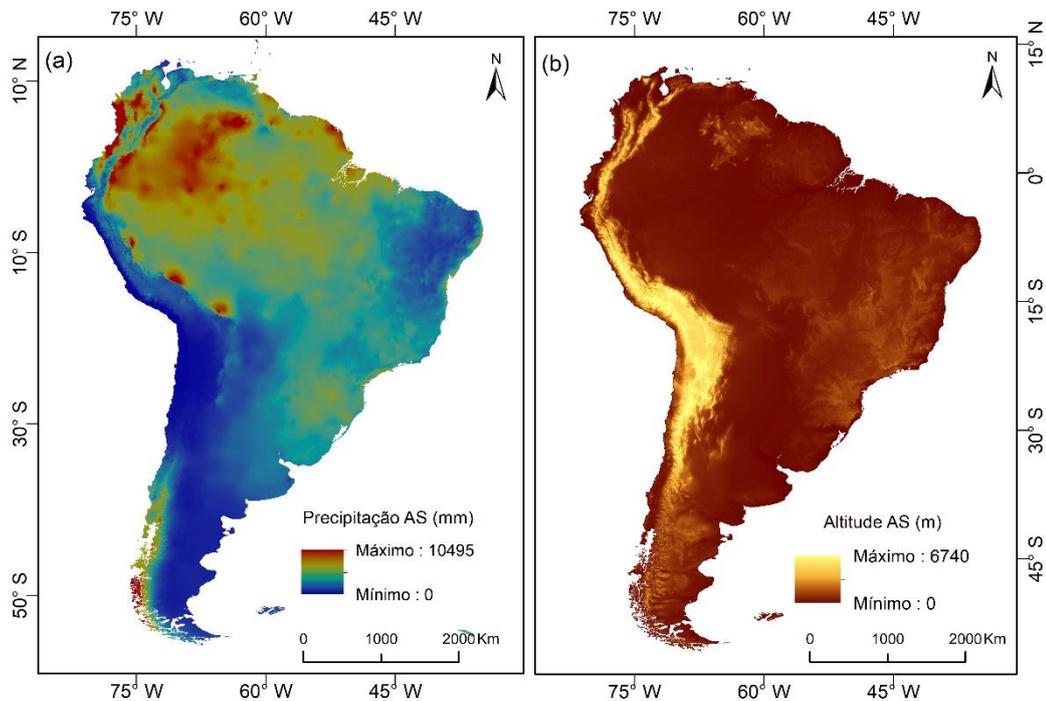


Figura 2: Mapa de precipitação média anual para a AS desenvolvido com base nos dados do WorldClim (a) e mapa de altitude (b).

Para o mapeamento do fator R na AS, foi ajustado um modelo de regressão múltipla cujas variáveis de entrada foram a precipitação média anual, latitude, longitude e altitude, com resolução espacial de 30 arco de segundos na linha do Equador (Figura 2), ou seja, a base oriunda do WorldClim. A utilização do modelo de regressão logarítmica ocorreu pela amplitude dos dados observados. O sistema de coordenadas geodésicas foi referenciada ao datum WGS84. O ajuste do modelo de regressão foi realizado com o software Statistical Analysis Software (SAS) conduzido com base no procedimento “stepwise”. Este procedimento permite analisar a significância das variáveis de entrada bem como possíveis auto correlações entre essas (MELLO et al. 2013; MELLO et al. 2015). A estrutura básica deste modelo é a seguinte:

$$\log_{10}R = (\beta_0 + \beta_1*LO + \beta_2*LO*LA + \beta_3*\ln(P) + \beta_4*A*P) \quad (1)$$

Em que R é a erosividade média anual da chuva em Megajoules milímetros por hectare por hora por ano ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); LA é a latitude, em graus (valor negativo no Sul); LO corresponde à longitude (em graus, valor negativo no Oeste); A é a altitude, em metros (m); P é a precipitação média anual, em milímetros (mm). Os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 da equação foram ajustados com base nos dados de erosividade da chuva (fator R), LO , LA , A e P obtidos de cada ponto apresentado na Figura 1. As estatísticas utilizadas para avaliar o modelo gerado foram: Coeficiente de determinação (R^2); Coeficiente de correlação (r); Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e Coeficiente de variação em porcentagem (CV).

Para o desenvolvimento do mapa do fator R para a AS, o modelo geográfico foi aplicado na ferramenta raster/álgebra de mapas, utilizando algoritmos de matriz disponíveis no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

3.4 Impactos das mudanças climáticas sobre o fator R na América do Sul

Para a quantificação das mudanças climáticas foram utilizados dados de precipitação total anual (não corrigidos) gerados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), disponibilizados na Plataforma PROJETA em formato CSV (Comma-Separated Values) para quase toda a extensão da AS, não estando disponível dados para o extremo sul do continente (CHOU et al. 2014a; CHOU et al. 2014b; LYRA et al. 2017; BRAZIL, 2016). Esses dados foram disponibilizados para uma resolução espacial de 20km, totalizando 37817 pontos sobre a AS. A fim de manusear adequadamente tais dados, uma rotina no Software Estatístico R foi desenvolvida a fim de usar todos os pontos e melhorar a representação espacial da chuva. Na sequência, para a geração dos mapas de precipitação foi realizado por meio do método de interpolação (krigagem ordinária), sistema de coordenadas geodésicas referenciadas ao datum WGS84, com resolução espacial de 90m.

No caso deste estudo, foram considerados os cenários de mudanças climáticas “Representative Concentration Pathway” (RCP) RCP4.5 (forçante radiativa de 4.5 W/m^2) e RCP8.5 (forçante radiativa de 8.5 W/m^2). Os RCPs foram estruturados de acordo com o Quinto Relatório (IPCC, 2013) e considerados como base para modelagem da atmosfera. O cenário RCP4.5 é baseado na consideração de que a forçante radiativa se estabiliza logo após o ano de 2100, limitado ao nível de radiação

de $4,5 \text{ W m}^{-2}$, com estabilização das emissões de metano (CH_4) e um aumento das emissões de CO_2 até 2040 (para 650 ppm de CO_2 equivalente na segunda metade do século XXI). O cenário RCP8.5 pressupõe um crescimento demográfico contínuo relacionado a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de CO_2 . Comparando-os, o cenário RCP8.5 é considerado o mais pessimista em termos de emissões de gases do efeito de estufa. (SILVEIRA et al., 2016).

Os modelos climáticos Hadley Center Global Environment Model version 2 (HadGEM2-ES), Model for Interdisciplinary Research On Climate version 5 (MIROC5) e The second generation Canadian Earth System Model (CANESM2), todos com regionalização pelo modelo Eta/CPTEC com resolução espacial de 20km.

O modelo HadGEM2-ES é um modelo climático global da categoria de sistemas terrestres desenvolvido pelo Hadley Center, com resolução é de cerca de 1.875 graus na longitude e 1.275 graus na latitude, e 38 níveis na atmosfera (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011); o modelo MIROC5 é um modelo desenvolvido em cooperação com o Japão, conhecido como Modelo de Pesquisa Interdisciplinar sobre o Clima, apresenta resolução de aproximadamente 150km na horizontal e 40 níveis na vertical (WATANABE et al., 2010). Para Chylek et al. (2010) o modelo CANESM2 une um modelo de circulação geral oceano-atmosfera, um modelo de vegetação terrestre e ciclo de carbono interativo terrestre e oceânico.

Foram então aplicados com base nas premissas dos cenários acima para quase toda a América do Sul, extraído-se os dados de precipitação média necessários para aplicação do modelo para o fator R. A partir desses dados, a precipitação média foi mapeada por período (períodos de 30 anos e 29 anos) (2010-2040; 2041-2070; 2071-2099), através da geoestatística (krigagem ordinária com ajuste do modelo esférico).

Tanto os mapas de precipitação média anual quanto do fator R gerados com base nos modelos climáticos para o tempo presente (1961-2005) foram comparados aos mapas gerados com base, respectivamente, nos dados de precipitação média (oriundos do WorldClim) e do fator R com base no modelo geográfico ajustado usando dados observados, para a AS. Ambas as comparações têm o intuito de analisar o comportamento dos modelos climáticos em simular tanto a precipitação média anual quanto o fator R para a AS. Para verificação da correlação existente entre os mapas do tempo presente e os MCG do tempo presente foi realizado mediante a utilização

da ferramenta Reclass disponível no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014), por meio de reclassificação em função dos valores agrupados em classes para cada mapa, assim foi adotado 10 classes para os mapas de precipitação média anual e 18 classes para o fator R médio anual.

A análise das projeções simuladas para os períodos de 2010 a 2099 foram conduzidas comparando-se os resultados obtidos para o tempo futuro (2010-2040; 2041-2070 e 2071-2099) em relação ao tempo presente e de forma consecutiva entre os mapas, permitindo uma análise de sensibilidade dos modelos climáticos.

4 Resultados e Discussão

4.1 Análise de desempenho dos modelos climáticos globais (MCG) na AS: comportamento da precipitação média anual para o tempo presente

A análise do comportamento dos modelos climáticos globais combinados com o modelo regional Eta aplicados neste estudo foi conduzida comparando-se os mapas de precipitação média anual, gerados com base em valores médios oriundos do WorldClim, e com base nas simulações usando os modelos climáticos para a América do Sul para o tempo presente (1961-2005).

Na figura 3 estão apresentados os valores médios de precipitação anual observados e simulados pelos modelos climáticos para as regiões geográficas da AS e os respectivos valores do coeficiente de variação, bem como o mapa gerado com base em dados do WorldClim. Na sequência, na figura 4, estão apresentados os mapas com a precipitação média para a AS para cada modelo.

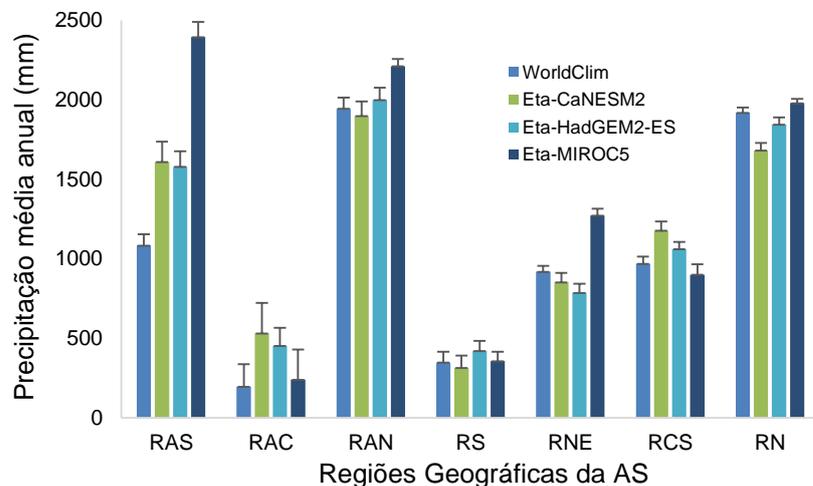


Figura 3: Precipitação média anual (mm) para as regiões geográficas da AS (colunas coloridas) para o tempo presente observado (WorldClim) e simulada pelos modelos climáticos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Barras de erro representam o coeficiente de variação.

Observa-se que a maior variabilidade dos dados de precipitação ocorre para a RAC e a RAS, com altos valores dos coeficientes de variação. Possivelmente isso ocorre devido às condições topográficas e da altitude marcante destas regiões, aumentando a variabilidade natural da precipitação. Por outro lado, os maiores valores

de precipitação média foram observados para a RN, RAN e RAS, as primeiras, influenciadas principalmente pela floresta amazônica e seu padrão de precipitação caracterizado por grande quantidade de vapor d'água e calor, e a última por ação de frentes frias que adentram ao território sul-americano.

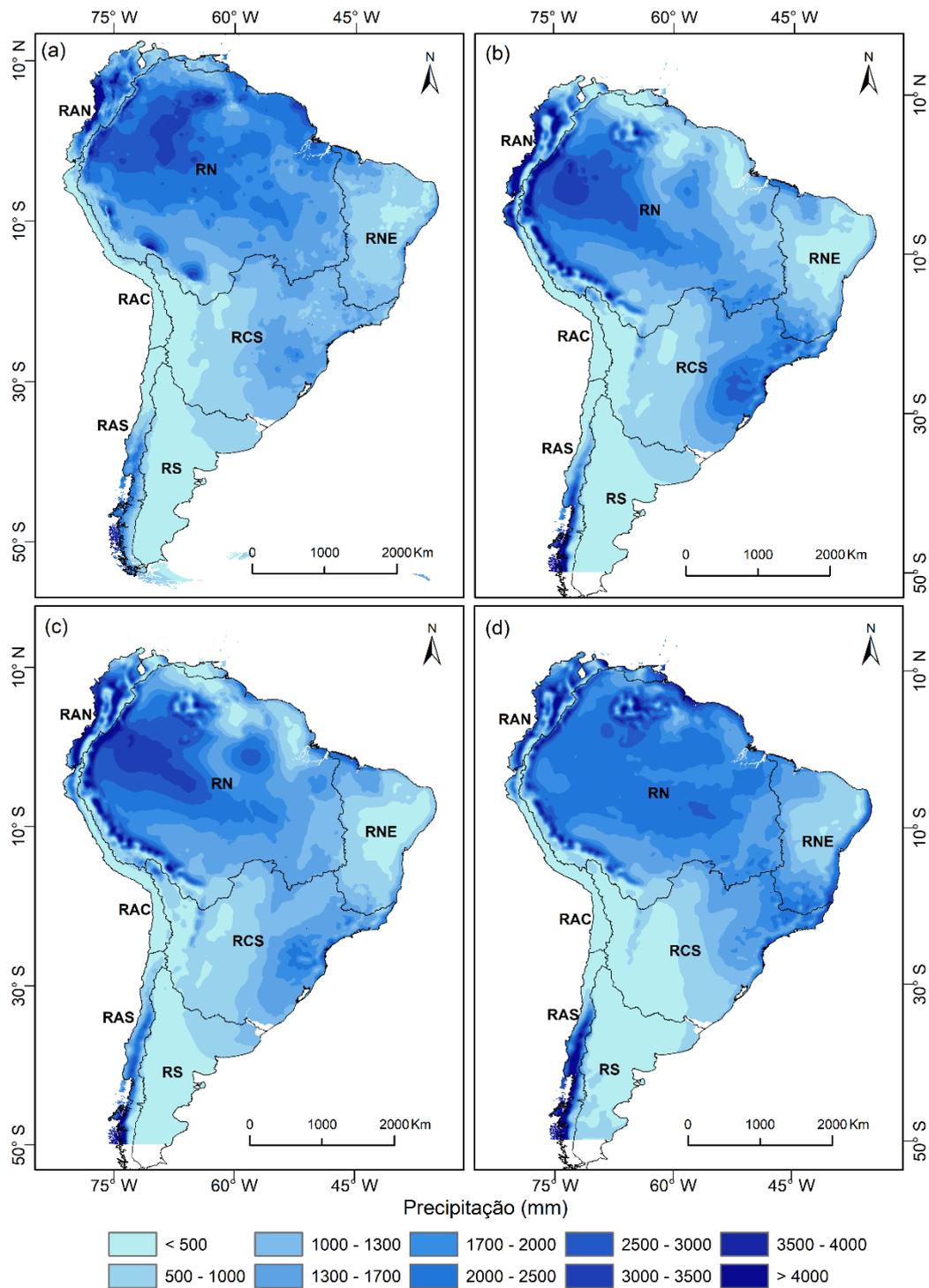


Figura 4: Mapas de precipitação média anual desenvolvidos com base em dados do WorldClim, para o período de 1950-2000 (a), e mapas de precipitação média anual simulados pelos modelos Eta-CanESM2 (b), Eta-HadGEM2-ES (c) e Eta-MIROC5 (d) para o período de 1961-2005.

Na figura 4a observa-se o mapa de precipitação média anual gerado com base nos dados oriundos do WorldClim. No mesmo, os maiores valores de precipitação são observados nas regiões tropical e equatorial, com forte presença de eventos de chuva com origem em intensa atividade convectiva e também influenciados por extensas faixas de umidade, tais como a ZCIT, que afeta a região equatorial conduzindo vapor d'água do Oceano Atlântico equatorial para o continente, e também da ZCAS, que afeta grande parte da região centro-norte e leste da AS (Reboita et al. 2010).

No tocante aos mapas simulados pelos modelos Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 (Figura 4b-d) observa-se discrepâncias espaciais nas simulações quando confrontados ao mapa da figura 4a. As diferentes condições climáticas da AS e sua complexidade topográfica condicionam alta variabilidade dos totais precipitados, gerando padrões com distintas características regionais, que vão desde regiões desérticas até a região Norte com floresta equatorial. É interessante destacar que na AS, no sentido sudoeste-nordeste, há uma oscilação significativa na precipitação: inicia-se com valores mais elevados no extremo sul do continente (região extratropical no sul do Chile e Argentina, marcado por boa distribuição temporal das chuvas e com marcante influência de frentes frias), seguido de uma redução significativa nesses totais no centro-norte da Argentina e Chile, regiões essas caracteristicamente secas; a partir daí, há aumento em direção ao centro da AS (Centro-Oeste e Sudeste do Brasil), ambos influenciados pela ZCAS e umidade oriunda da região amazônica durante o verão. Finalmente, há uma nova redução marcante em direção ao extremo nordeste da AS (semiárido do Nordeste do Brasil). Todos os modelos conseguiram captar esse comportamento espacial da precipitação na AS, o que demonstra a capacidade dos mesmos em simular de forma satisfatória o padrão da precipitação média no continente.

Analisando o mapa da figura 4d, é possível observar espacialmente que o modelo Eta-MIROC5 conseguiu captar de forma satisfatória o padrão espacial da precipitação na região leste da AS (transição do Centro-Oeste para o Sudeste do Brasil), a qual é influenciada por vários fenômenos atmosféricos e também por cadeias de montanhas espalhadas tanto próximas ao litoral (Serras da Mantiqueira e do Mar) bem como no interior do continente. O modelo Eta-CanESM2 também conseguiu captar essa diferença, porém, simulando valores mais elevados de precipitação anual. Outro detalhe espacial melhor captado pelo Eta-MIROC5 foi na simulação da precipitação média anual na região do semiárido do Brasil, a qual é influenciada por

uma Célula de Hadley (centro permanente de alta pressão), conforme Reboita et al. (2010), apresentando um padrão errático de precipitação, ou seja, distribuição temporal irregular e influenciado pelos fenômenos associados ao ENSO (El Niño Oscilação Sul).

Para a região amazônica, os modelos Eta-CanESM2 e Eta-HadGEM2-ES simularam de forma mais precisa o comportamento espacial e o respectivo padrão da precipitação média anual. Observa-se um nítido gradiente no sentido Noroeste-Sudeste desta região, o qual foi melhor identificado pelos citados modelos, em especial, o Eta-CanESM2. Isso significa que as Zonas de Convergência Intertropical e do Atlântico Sul foram adequadamente simuladas e ambas têm uma importância chave para o clima da AS, erosividade da chuva incluída. Com isso pode-se observar que os modelos simularam de forma satisfatória as diferentes variações de precipitação, porém, cada um com algumas suas particularidades específicas.

Na figura 5 estão apresentadas correlações entre os mapas simulados e o gerado com base nos dados do WorldClim. Tal comparação realizou-se comparando pixel a pixel dos mapas dos MCG com o mapa do WorldClim, onde foi realizada uma reclassificação dos valores agrupados em classes adotadas previamente na simbologia dos mapas de precipitação (ferramenta reclass disponível no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014)), atribuindo a cada categoria uma classe (assim, a classe 1 corresponde a valores inferiores a 500mm; classe 2 se refere aos valores entre 500 a 1000mm e assim sucessivamente até a classe 10 que representa pixels com valores superiores a 4000mm) representando pixels contidos em cada intervalo, na sequência foi possível obter o coeficiente de correlação resultante. Cabe destacar que as 10 classes representam os 10 pontos contidos em cada gráfico na figura 5. Todos os modelos apresentaram um coeficiente de correlação (r) superior a 0,70, assim, o modelo que apresentou a maior correlação foi o Eta-HadGEM2-ES, seguido pelo Eta-CaNESM2 e Eta-MIROC5.

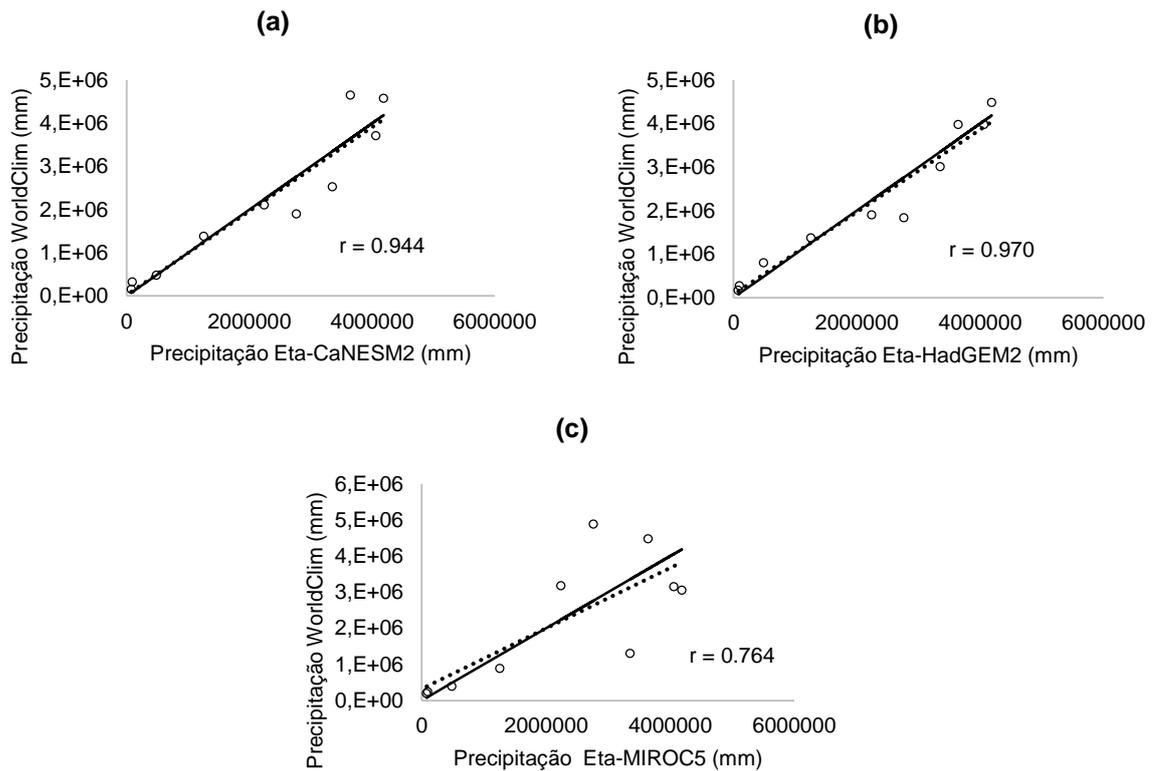


Figura 5: Comparação estatística dos mapas gerados com base nos dados do WorldClim e simulados pelos modelos Eta-CaNESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c) para o tempo presente.

A região central da AS, considerada neste estudo parte da RCS, é caracterizada por diferentes padrões climáticos. O modelo Eta-MIROC5 não simulou de forma satisfatória a precipitação média anual. Contudo, para a RCS como um todo, este modelo conseguiu capturar a flutuação da precipitação, mesmo havendo diferentes atributos geográficos e diferentes dinâmicas dos sistemas atmosféricos que atuam na região. Nesta região, o modelo Eta-MIROC5 subestimou os valores em parte da região Norte da Argentina e do Sul do Brasil, com regime regular de precipitação entre as estações do ano (pequena variabilidade temporal), com predominância de frentes frias. No entanto, superestima a região da patagônia chilena no extremo Sul da AS. Na região da Cordilheira dos Andes, observa-se que o modelo superestima em algumas partes da mesma, contudo, na região mais árida do continente, incluindo a porção centro-sul da Argentina, norte do Chile e a costa peruana, o modelo conseguiu captar razoavelmente bem a baixa pluviosidade desta ($<300 \text{ mm.ano}^{-1}$). No tocante à precipitação na Bolívia, o modelo conseguiu estimar relativamente bem o gradiente pluviométrico, com maiores valores ao leste da Cordilheira dos Andes.

O modelo Eta-CaNESM2 superestimou a precipitação para algumas regiões do continente, tais como, na região sul do Brasil, região do extremo sul do Chile, e centro-oeste do Brasil. Para a costa atlântica do Rio Grande do Norte (Brasil) até a costa da Venezuela, observa-se subestimativa dos valores sendo uma região caracterizada por altos níveis pluviométricos como já mencionado, especialmente pela ação da ZCIT. Nas demais regiões, o modelo mostrou bom desempenho na simulação da distribuição da precipitação no continente.

Foi possível observar que o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou o maior coeficiente de correlação ($r=0,97$) na comparação entre os mapas, retratando estatisticamente melhor a distribuição da precipitação no continente que os demais modelos, sendo efetivo em capturar os efeitos de diferentes fenômenos atmosféricos e topográficos que afetam o padrão da precipitação na AS. Contudo, algumas exceções merecem destaque: para a região do Nordeste do Brasil e ao longo da costa até a Venezuela, o modelo subestimou a precipitação, assim como o modelo Eta-CaNESM2; e também para a região amazônica (Norte da AS), onde o modelo superestimou a precipitação, assim como na região Sul do Brasil.

4.2 Projeção da precipitação média anual ao longo do século XXI pelos modelos climáticos globais para AS

Para os cenários RCPs 4.5 e 8.5, no período de 2010 a 2099, são apresentados os valores médios para cada período (média de 30 anos), simulados pelos modelos climáticos globais com regionalização pelo Eta, com resolução espacial de 20km.

4.2.1 RCP 4.5

Na figura 6 é possível observar a precipitação média e o coeficiente de variação para as principais regiões geográficas da AS e a variação dos valores estimados pelos modelos em relação ao tempo presente. No tocante à precipitação média (Figura 6a), os modelos apresentam comportamento similar entre as regiões, ressaltando que todos apresentaram maior variabilidade nas regiões RAS e RAN, como observado para o tempo presente (Figura 3). Para a RN, os modelos simularam as maiores médias e a menor variabilidade dos dados, enquanto para a RS e a RAC, os menores valores. Em relação às variações confrontadas ao tempo presente pode-se observar (Figura 6b) que os modelos para a RAS projetam aumento da precipitação, enquanto

que para a RAN e RN, diminuição. Para as demais regiões, há discrepâncias, com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanNESM2 simulando redução para a RNE, e o Eta-MIROC5, aumento. Para a RCS, apenas o modelo Eta-CaNESM2 simulou aumento da precipitação, de aproximadamente 250mm, enquanto os demais modelos simularam uma ligeira redução, de 50mm.

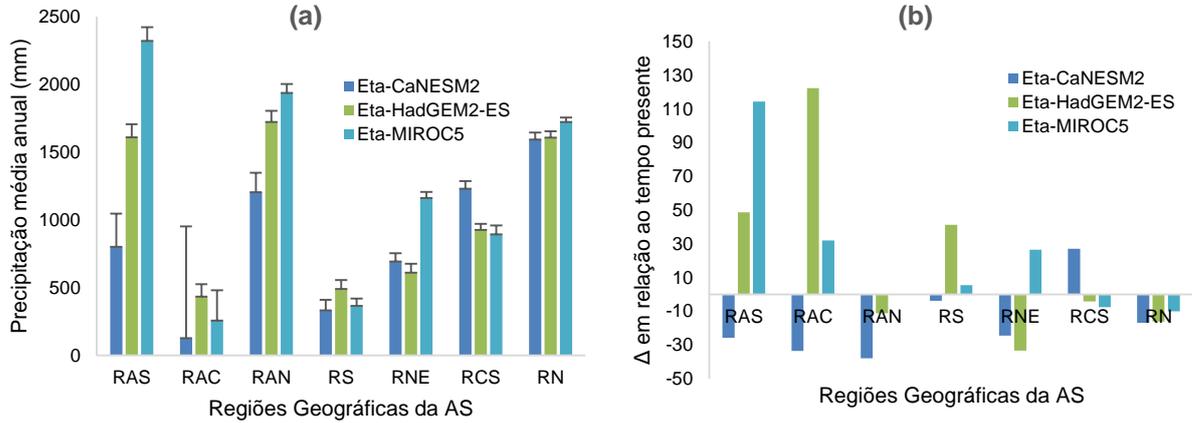


Figura 6: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 4.5.

O comportamento descrito acima também pode ser observado na forma de mapas gerados pelo método de interpolação através de krigagem ordinária, conforme figura 7.

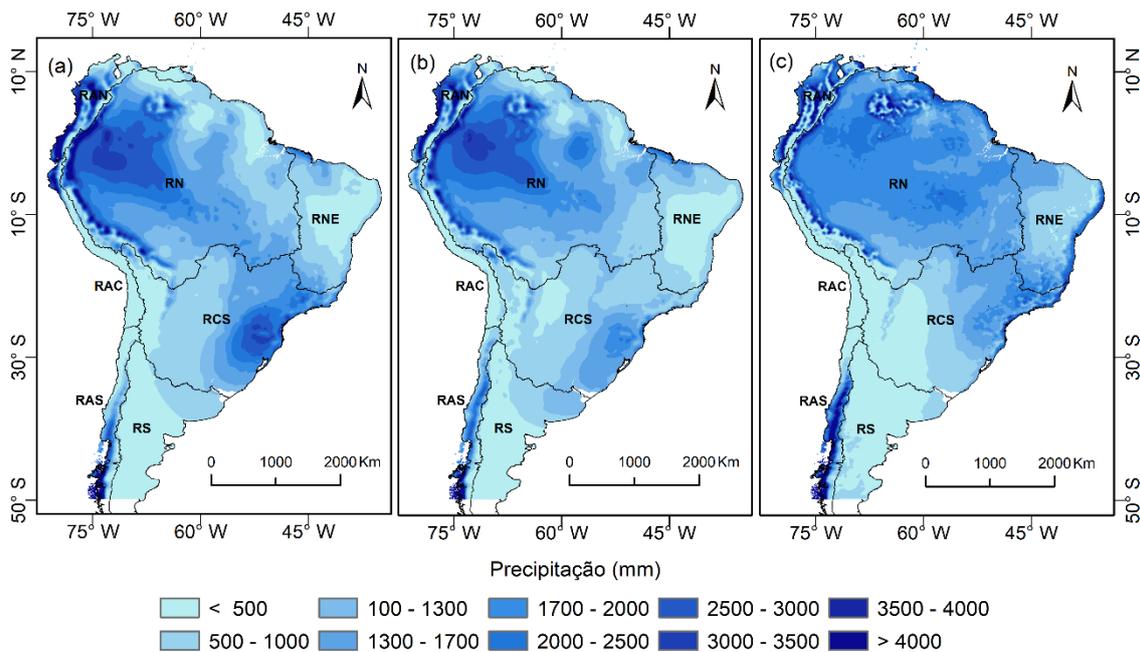


Figura 7: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 (a. Eta-CaNESM2-ES; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

Aonde as simulações demonstram a existência dos gradientes observados no tempo presente, sendo esta uma das principais características do padrão de chuvas na AS. A exceção foi o modelo Eta-MIROC5 (Figura 7c) para a região centro-norte da Argentina, sudeste e noroeste do continente, o qual não simulou o comportamento mencionado.

Na sequência observa-se o comportamento dos modelos em termos de média e coeficiente de variação (Figura 8).

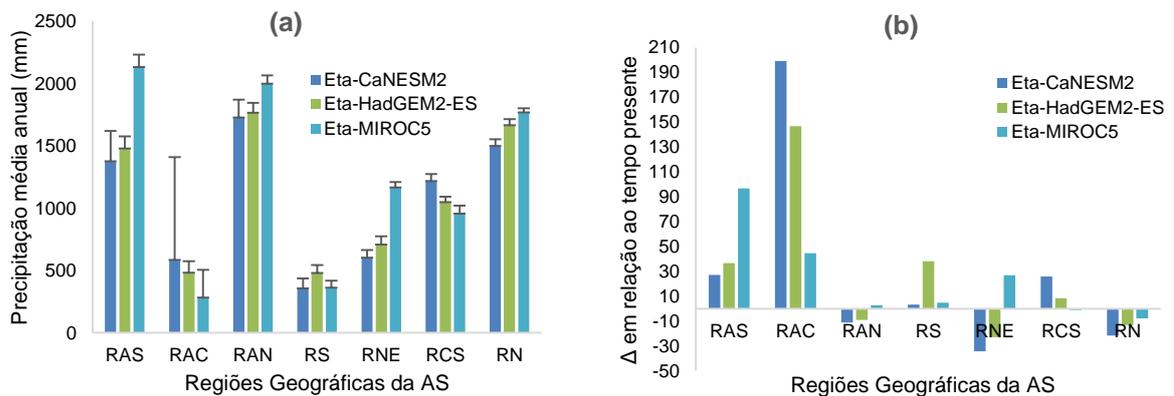


Figura 8: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões hidrográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2041-2070 (b). RCP 4.5.

Para o período 2041-2070 (Figura 8) é possível observar que em relação ao tempo presente não há variações expressivas. Assim, o padrão de precipitação na AS não sofreria grandes mudanças neste período em relação ao período anterior, exceto para o modelo Eta-HadGEM2-ES que apresenta leve aumento da precipitação na RCS e maior diminuição da precipitação na RNE pelo modelo Eta-CaNESM2.

O padrão espacial da precipitação observa-se na Figura 9, de forma que os modelos projetaram maiores volumes de chuva para a RN e menores para as regiões RS e RAC. Na RS, o modelo Eta-MIROC5 simulou um comportamento diferente em relação aos outros modelos, não demonstrando o mesmo padrão espacial de precipitação especialmente para a região centro-norte da Argentina, sudeste e noroeste do continente, como nos demais modelos. Este comportamento também foi observado para o período anterior.

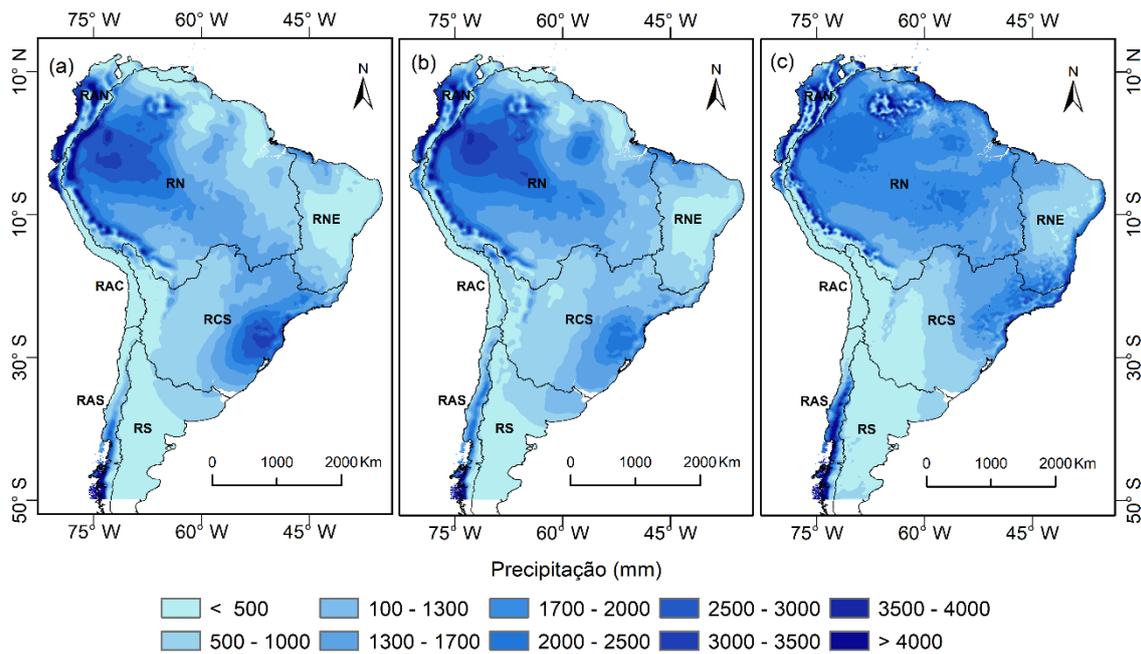


Figura 9: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

No tocante a distribuição da precipitação observa-se na figura 10 a precipitação média e coeficiente de variação período 2071-2099.

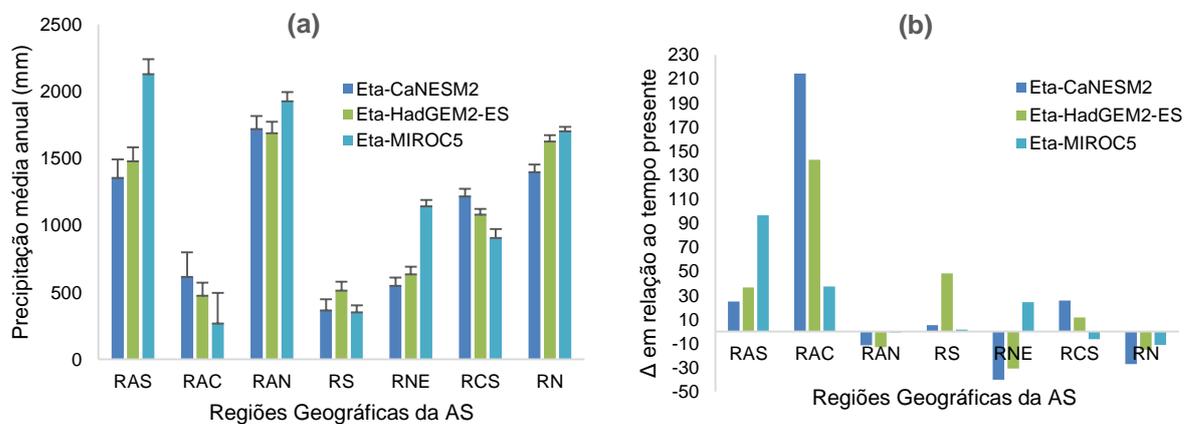


Figura 10: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 4.5.

Para o período este período é possível observar que não houve variação expressiva em relação ao tempo presente, mantendo padrão similar ao das décadas anteriores (Figura 10a), assim como a variabilidade, que se mantém elevada nas regiões RAS e RAN, e baixa na RN. No entanto, na figura 10b, para a RN, verifica-se uma diminuição, superior a 190mm, na simulação com o modelo Eta-CaNESM2 se

confrontada ao período 2010-2040. Para as demais regiões, as variações em relação ao tempo presente se mantêm sem mudanças expressivas.

Na figura 11, apresenta-se a distribuição espacial da precipitação média na AS para o período 2071-2099.

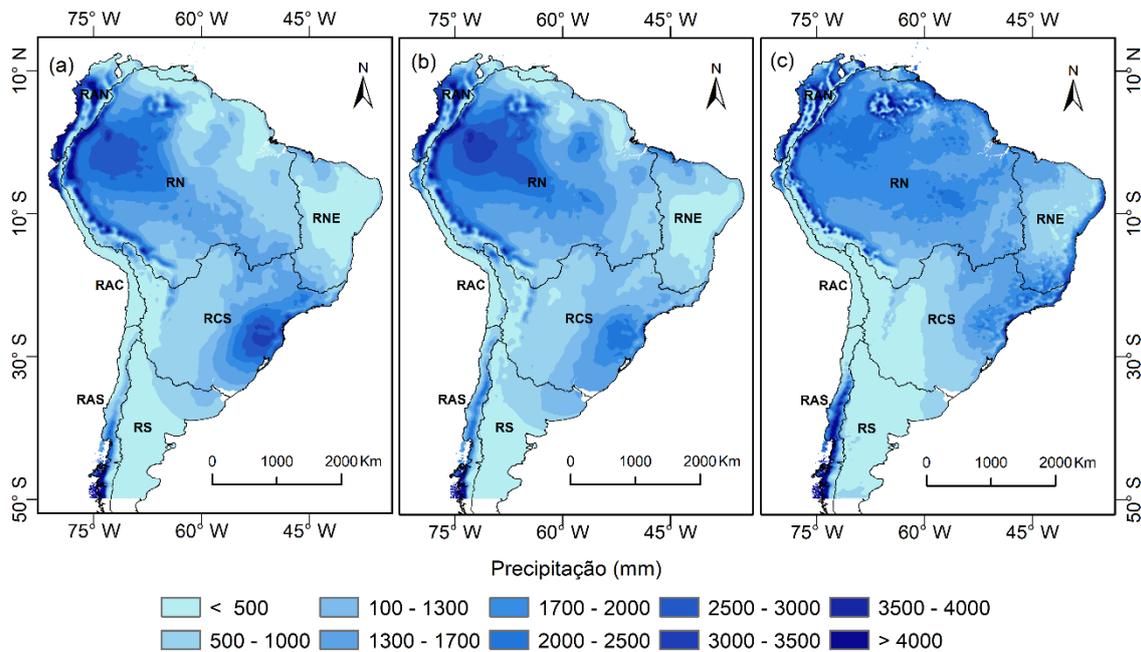


Figura 11: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

Observa-se que os modelos projetam comportamento semelhante aos períodos anteriores. A distribuição espacial da chuva segue a mesma tendência simulada nos períodos anteriores, com máximos para as regiões RAS, RAN e RN, e mínimos nas regiões RAC e RS. Novamente, o modelo Eta-MIROC5 (Figura 11c) projetou redução da precipitação na região RS, especialmente para o centro-norte da Argentina, e no sudoeste da RCS.

No tocante ao comportamento geral das simulações futuras para o cenário RCP4.5, foi possível observar um padrão semelhante entre os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, onde projeta-se diminuição da precipitação média para RAN, RN, RNE e aumento para RAS, RAC, RS, RCS. Usando o modelo Eta-MIROC5, observa-se simulação da diminuição da precipitação média para RCS e RN, assim como projeta-se aumento para RAS, RAC, RAN, RS e RNE. As maiores discrepâncias nas projeções ocorreram na RNE (aumento), e RCS e RN (redução em

ambas); nas demais regiões há concordância quanto ao comportamento médio da precipitação na AS.

De forma similar, é possível analisar os efeitos das mudanças climáticas sobre a precipitação média considerando a variação consecutiva ao longo do tempo (Figura 12).

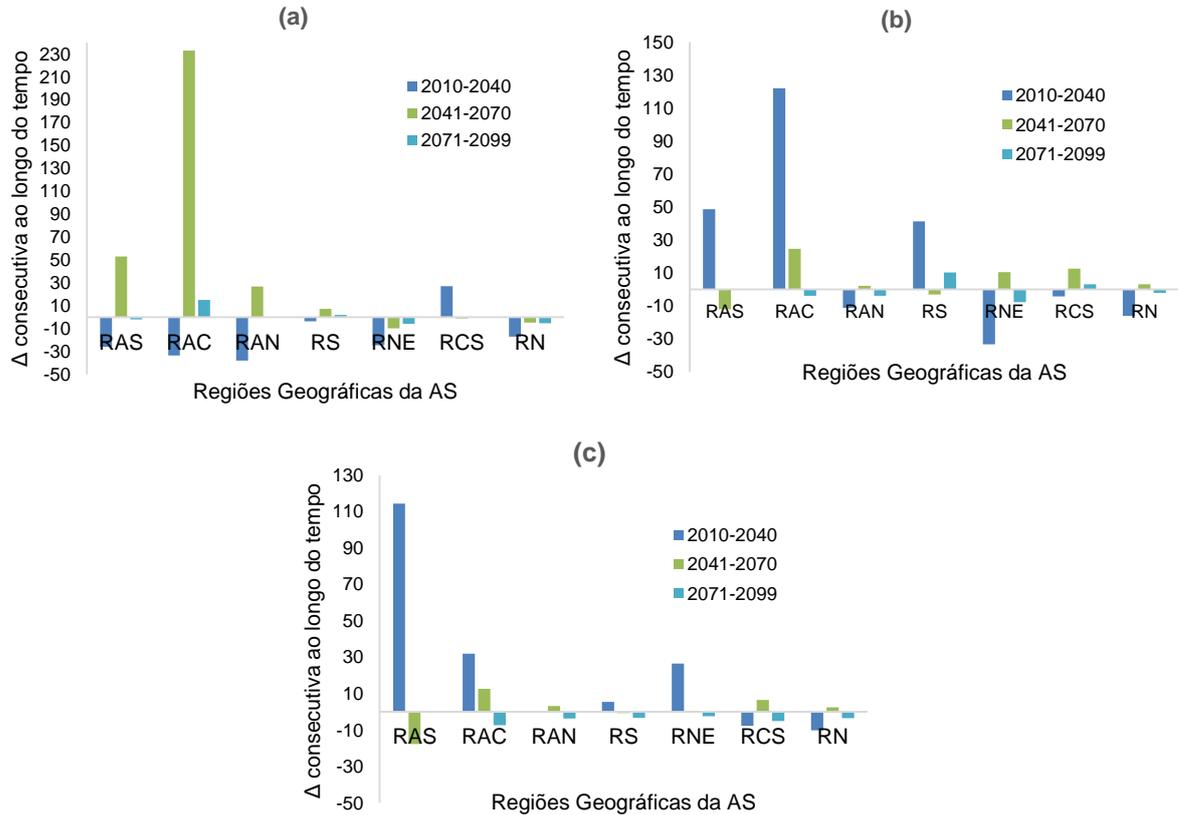


Figura 12: Variação consecutiva da precipitação ao longo do tempo (%) para o RPC 4.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). RCP4.5.

Na figura 12 observa-se o comportamento da precipitação média anual ao longo dos períodos. Sua variação máxima é observada no período 2010-2040, este em relação ao tempo presente. Os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES projetaram redução da precipitação nas regiões RAN, RN e RNE. Para a RAS, os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES simularam aumento expressivo da precipitação média. Na região dos Andes (RAS, RAC e RAN), o modelo Eta-CaNESM2 foi o único que simulou aumento das chuvas para o período 2041-2070.

Com base nos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, as regiões da AS mais afetadas com redução da precipitação média deverão ser as regiões Norte e Nordeste, abrangendo o extremo norte da AS, a região amazônica, assim como a

região Nordeste do Brasil, com reduções da ordem de 38%; 11% para RAN; 17% para RN e até 33% para RNE. Em ambas as regiões e modelos, o primeiro período produzirá um impacto bastante severo na precipitação média, simulados pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES. Para a RAS, ambos os modelos projetam um aumento (>110% e >40%), respectivamente, no primeiro período. Para o período seguinte, o modelo Eta-CaNESM2 projeta aumento importante da precipitação média para a RAS, RAC, RAN na ordem de, respectivamente, 41%, 77% e 30%.

Para a RS da AS, todos os modelos apresentaram comportamento semelhante, exceto com aumento no primeiro período, da ordem de 41% pelo modelo Eta-HadGEM2-ES; na sequência, os modelos simularam uma pequena variação da precipitação, divergindo entre os mesmos. Algumas discrepâncias adicionais entre os modelos são importantes de se destacar uma vez que refletem na incerteza dos resultados:

- a) O modelo Eta-MIROC5 foi o único a simular aumento da precipitação média na RNE da AS no primeiro período; este modelo também simulou um aumento de aproximadamente 60 mm para a RCS da AS no segundo período, insuficiente para recuperar a redução simulada no primeiro período por este modelo;
- b) O modelo Eta-CaNESM2 simulou aumento da precipitação média na RCS da AS no primeiro período (em torno de 27%), enquanto os demais simularam redução;
- c) Ao longo do século XXI, a região dos Andes poderá apresentar redução total da precipitação de 38% para RAN, projetado pelo modelo Eta-CaNESM2; no entanto para a RAS, projeta-se aumento de 114% e 49%, respectivamente, pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5;
- d) A RN da AS apresentou a seguinte situação nas simulações: aumento pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, e redução pelo modelo Eta-MIROC5.

4.2.2 RCP 8.5

Para o cenário RCP 8.5, são apresentadas as projeções da precipitação média anual para cada período pelos modelos climáticos globais. Deste modo, na Figura 13 observa-se a precipitação média anual e a variação em relação ao tempo presente.

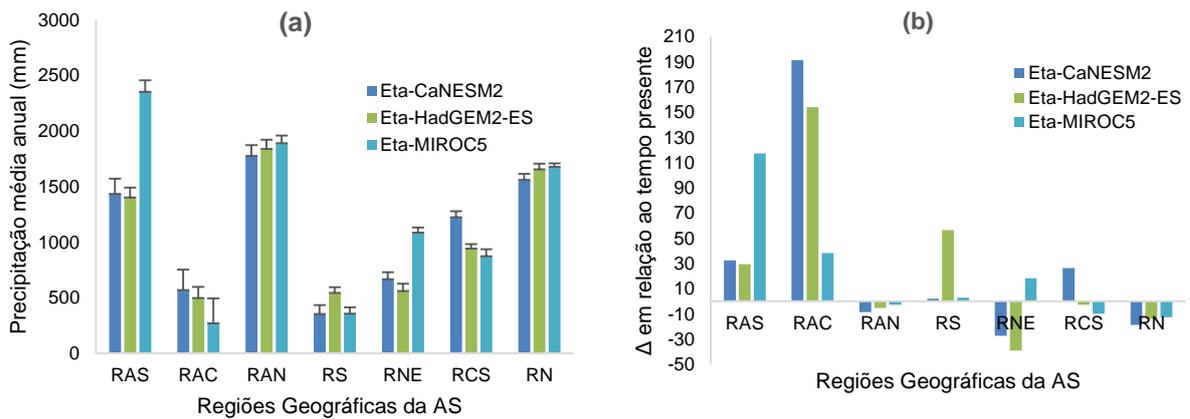


Figura 13: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 8.5.

Para o período 2010-2040 (Figura 13a) é possível observar que a precipitação média nas regiões RAS e RAN apresenta maior variabilidade, com valores superiores a 1400mm e 1700mm, respectivamente, podendo atingir 2300mm e 1800mm com modelo Eta-MIROC5. Para a RN da AS foi observada média superior a 1550mm e menor variabilidade dos dados, os quais podem atingir aproximadamente 1650mm. Este comportamento das simulações para este cenário não apresenta variações expressivas em relação ao cenário RPC4.5 para o mesmo período, exceto para as simulações com os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, com aumento superior a 30%. Em relação ao tempo presente (Figura 13b), as regiões mais afetadas deverão ser RN, RAS e RAC, com diminuição superior a 13%, enquanto que, nas regiões RAS e RAC, projetou-se aumento da precipitação, podendo ser superiores a 115% e 190%, respectivamente, com variações pouco relevantes quando comparadas ao RPC4.5 para o mesmo período.

Em relação à distribuição espacial da precipitação, os modelos simularam de forma semelhante ao observado no tempo presente, ou seja, os gradientes de precipitação característicos da AS, mencionados anteriormente (Figura 14).

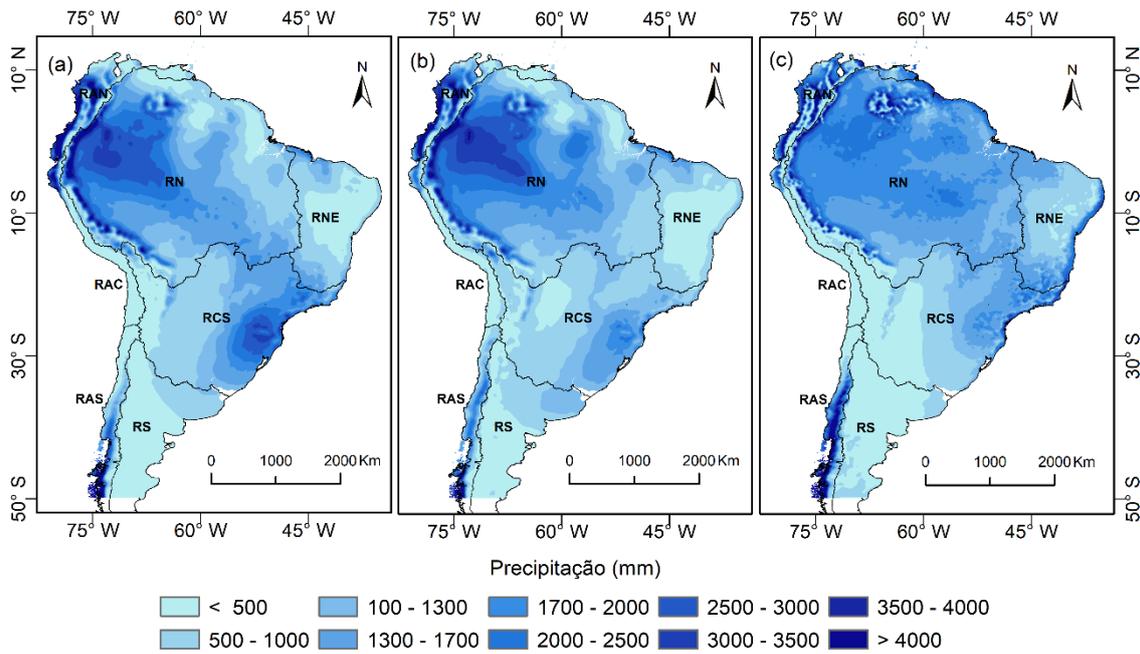


Figura 14: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

Ao observar a figura 14a-b ficam evidentes as áreas com maior e menor níveis da precipitação. As projeções desenvolvidas com o modelo Eta-MIROC5 (Figura 14c) não captam este comportamento na região centro-norte da Argentina, tal como também foi observado no cenário RPC4.5. Outra diferenciação que pode ser observada nos cenários para este período é um aumento superior a 3000mm, distribuídos a noroeste da AS (RAN), região essa predominante amazônica, marcada por volumes elevados de precipitação.

Na figura 15 observa-se a precipitação média anual e variação em relação ao tempo presente.

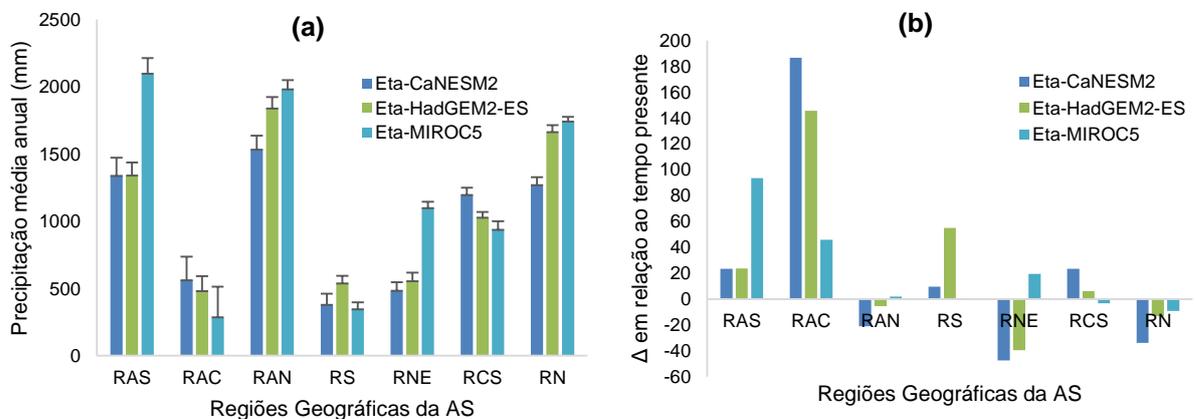


Figura 15: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões hidrográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2041-2070 (b). RCP 8.5.

Para o período 2041-2070 observa-se na figura 15a a precipitação média anual e os respectivos coeficiente de variação, apresentando maior variabilidade para as regiões RAS e RAN. A RN apresenta baixa variabilidade dos dados e média superior a 1200mm pelo modelo Eta-CaNESM2, podendo atingir 2000mm, simulado pelo modelo Eta-MIROC5.

Ao ser confrontado ao período anterior, o modelo Eta-CaNESM2 apresenta diminuição da precipitação média, acentuando-se este comportamento nas regiões RN e RAN, com diminuição superior a 18% e 12%, respectivamente, e nas demais regiões não apresenta variações importantes entre os períodos. Contudo, as simulações com o modelo Eta-MIROC5 não apresentaram aumento da precipitação para as regiões neste período. Com o modelo Eta-HadGEM2-ES não foram observadas variações expressivas em relação ao período anterior.

Em relação a variação com o tempo presente observa-se na figura 15b diminuição da precipitação nas regiões RAN, RNE e RN, com maior redução na RNE e RN, na ordem de 21%, 47% e 34%, respectivamente, projetados pelo modelo Eta-CaNESM2. Também se destacam aumentos expressivos nas regiões RAS e RAC, com 97% e 187% simulados, respectivamente, pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-CaNESM2. O modelo Eta-HadGEM2-ES destaca-se como o único que projetou aumento expressivo na RS, de aproximadamente 55%. O modelo Eta-CaNESM2 simula elevação significativa de 23% na RCS, enquanto os demais modelos apresentaram discrepâncias quanto ao comportamento projetado.

No que concerne à distribuição espacial da precipitação na AS (Figura 16) possível observar que o gradiente espacial da precipitação, observado no tempo presente, se mantém, porém, com redução nos valores para as regiões RNE, RN e RAS.

As mudanças mais expressivas podem ser observadas na figura 16a, onde o modelo Eta-CaNESM2 simula diminuição significativa para as regiões RN, RNE e RAN, observando-se aumento das áreas com valores inferiores a 500mm. Ressalta-se que essas regiões historicamente apresentam volumes elevados de precipitação, exceto a RNE, que apresenta padrão inverso. O modelo Eta-HadGEM2-ES (Figura 16b) projeta ampliação espacial dos valores inferiores a 500mm na RNE, no entanto, para a RN observa-se um aumento espacial dos níveis de precipitação superiores a 1000mm, elevando-se no sentido norte da AS.

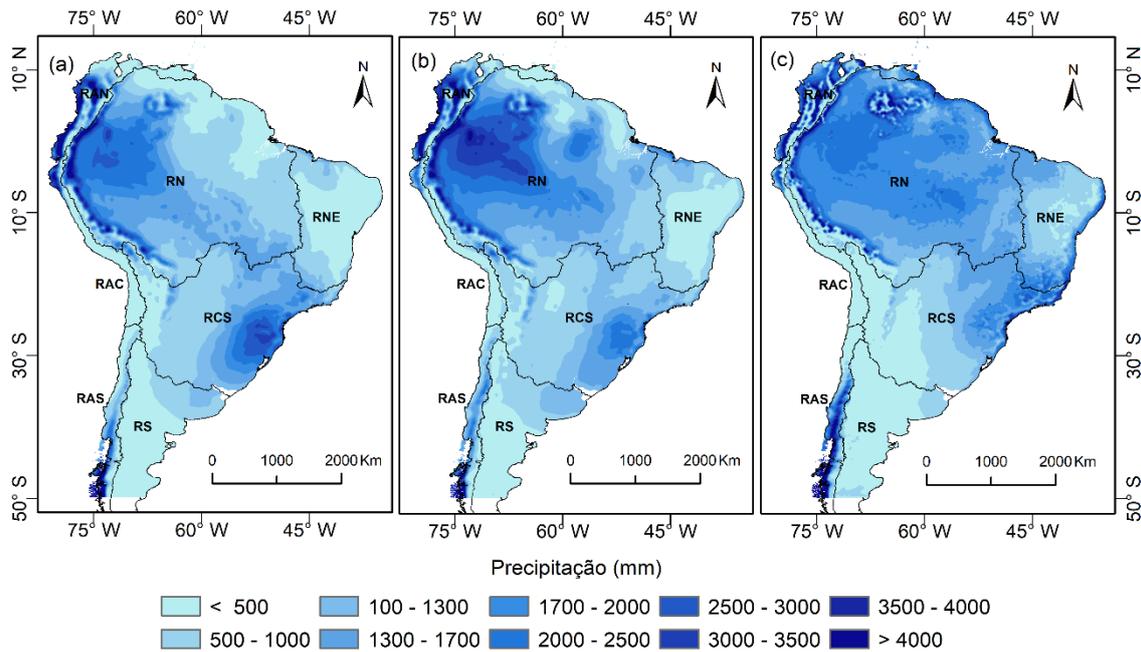


Figura 16: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

Esse padrão de projeção se observa de maneira semelhante na figura 16a. Não obstante, o modelo Eta-MIROC5 (Figura 16c) simula a precipitação no continente de maneira mais aproximada ao tempo presente, exceto na região centro-norte da Argentina, onde valores inferiores a 500mm foram projetados, assim como também observado no RPC4.5, diferenciando-se das projeções dos demais modelos para este período.

Em relação ao período 2071-2099, foram projetados os menores totais médios de precipitação anual considerando o RCP8.5 (Figura 17).

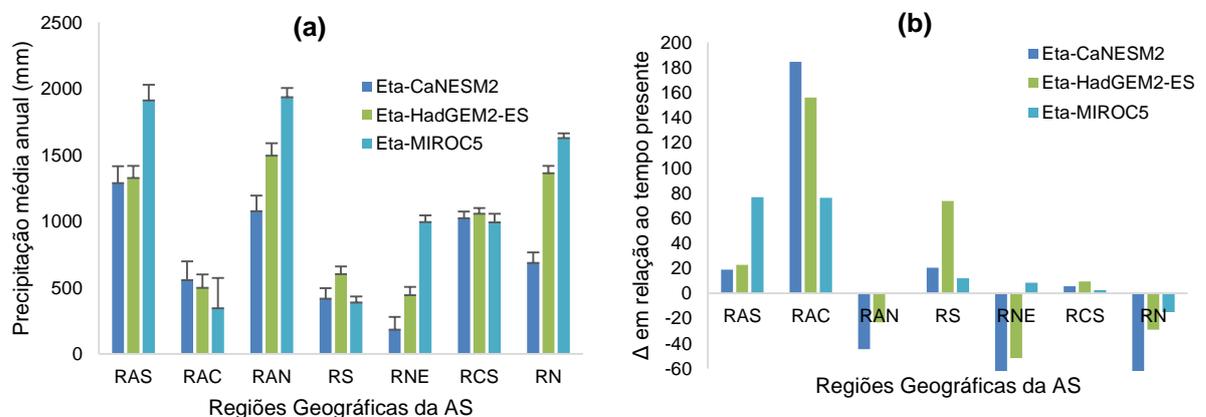


Figura 17: Precipitação média e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 8.5

Seguindo o padrão de maior variabilidade na figura 17 dos dados nas regiões RAS e RAN, e menor na RN, com média superior a 1200mm, podendo alcançar 1900mm, e para a RN, de 680mm a 1620mm (Figura 17a). Referente às regiões com maior variabilidade, comparando-se com o período anterior, é possível identificar que as regiões RN, RAN e RNE se destacam. O modelo Eta-CaNESM2 caracterizou para este período uma maior variação, seguido do modelo Eta-HadGEM2-ES. No entanto, o modelo Eta-MIROC5 apresenta mudanças menos expressivas nos padrões de chuva para a AS, exceto para a RAS, com aumento expressivo da precipitação na ordem de 76%. Em relação às variações confrontadas ao tempo presente (Figura 17b), o maior valor foi encontrado para RNE, com maior diminuição, seguido da RN e RAN, respectivamente, na ordem de 80%, 64% e 45%, projetadas pelo modelo CaNESM2. Destaca-se para a RAC, aumentos importantes da precipitação projetados pelos modelos de 184%, 156% e 76%, respectivamente simulados pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Nas demais regiões há conformidade quanto ao aumento da precipitação nas regiões RAS, RS e RCS, assim como redução nas regiões RNE, RN e RAN. As regiões RS e RCS são as aquelas com menor flutuação projetada pelos modelos, sendo que este comportamento também foi simulado para o período anterior. Na figura 18 visualiza-se a distribuição espacial da precipitação simulada para este período.

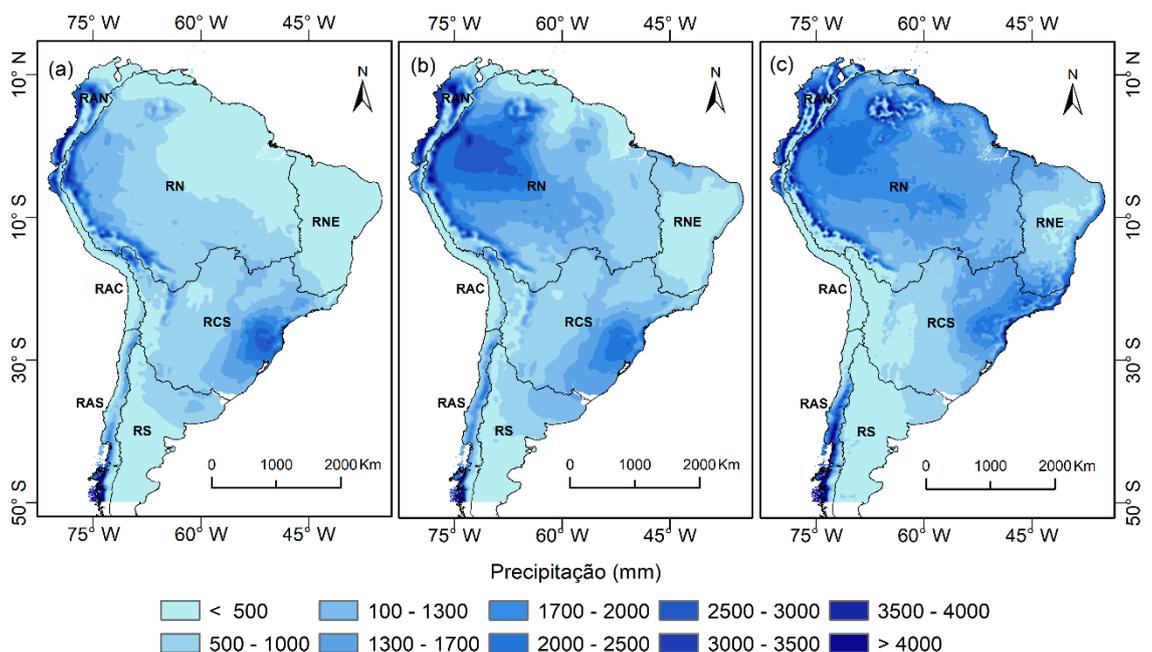


Figura 18: Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5). Mapas gerados por interpolação no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014).

Na figura 18a destacando-se as regiões mais afetadas pela diminuição da precipitação projetada pelo modelo Eta-CaNESM2. As regiões RN, RNE e parte da RAN serão as mais afetadas, com valores inferiores a 500mm, destacando-se diminuição da precipitação em toda a região Norte e Nordeste da AS.

O modelo Eta-HadGEM2-ES (Figura 18b) simula o gradiente espacial das chuvas com diminuição para as regiões RNE e RN, com projeção semelhante ao período anterior. O modelo Eta-MIROC5 (Figura 18c), não segue a mesma tendência de projeção que os outros modelos quanto à distribuição espacial da precipitação, sem grandes variações em relação ao período anterior, destacando também, valores inferiores a 500mm região centro-norte da Argentina e sudeste da AS. Quanto às projeções para este período, o modelo Eta-CaNESM2 simula as diminuições mais importantes da precipitação em todo o continente; já o modelo Eta-HadGEM2-ES, projeta mudanças intermediárias, com diminuição para as regiões RNE e RN em menor escala. Por outro lado, o modelo Eta-MIROC5 mantém as projeções sem grandes variações quanto a distribuição dos níveis de precipitação na AS nas projeções considerando o RCP8.5.

Considerando a variação consecutiva simulada pelos modelos, a figura 19 apresenta os resultados para cada região da AS referentes ao RCP8.5. Assim sendo, os períodos com maiores alterações na precipitação média da AS foram projetados para os períodos 2071-2099 e 2010-2040 para região dos Andes, Norte e Nordeste, projetado pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Para a RAS, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 simularam elevação da precipitação para o período 2010-2040 na ordem de 32%, 29% e 117%, respectivamente. Os modelos apresentaram comportamento semelhante para a RAC, com elevação significativa da precipitação de 191%, 154% e 38%, respectivamente, sendo que historicamente esta região caracteriza-se por baixos volumes pluviométricos. Quanto a RN, apresenta-se projeção de redução significativa da precipitação no período 2071-2099: 60%, 16% e 6% pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Para a RAN também projetou-se importante diminuição simulada pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, de 23% e 18%, respectivamente. De forma semelhante, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 simularam para a RNE diminuição da precipitação na ordem de 32%, 12% e 11%, respectivamente. No entanto, a simulação com os

modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CaNESM2 destacam-se no período de 2010-2040, com reduções expressivas da precipitação (39% e 27%, respectivamente).

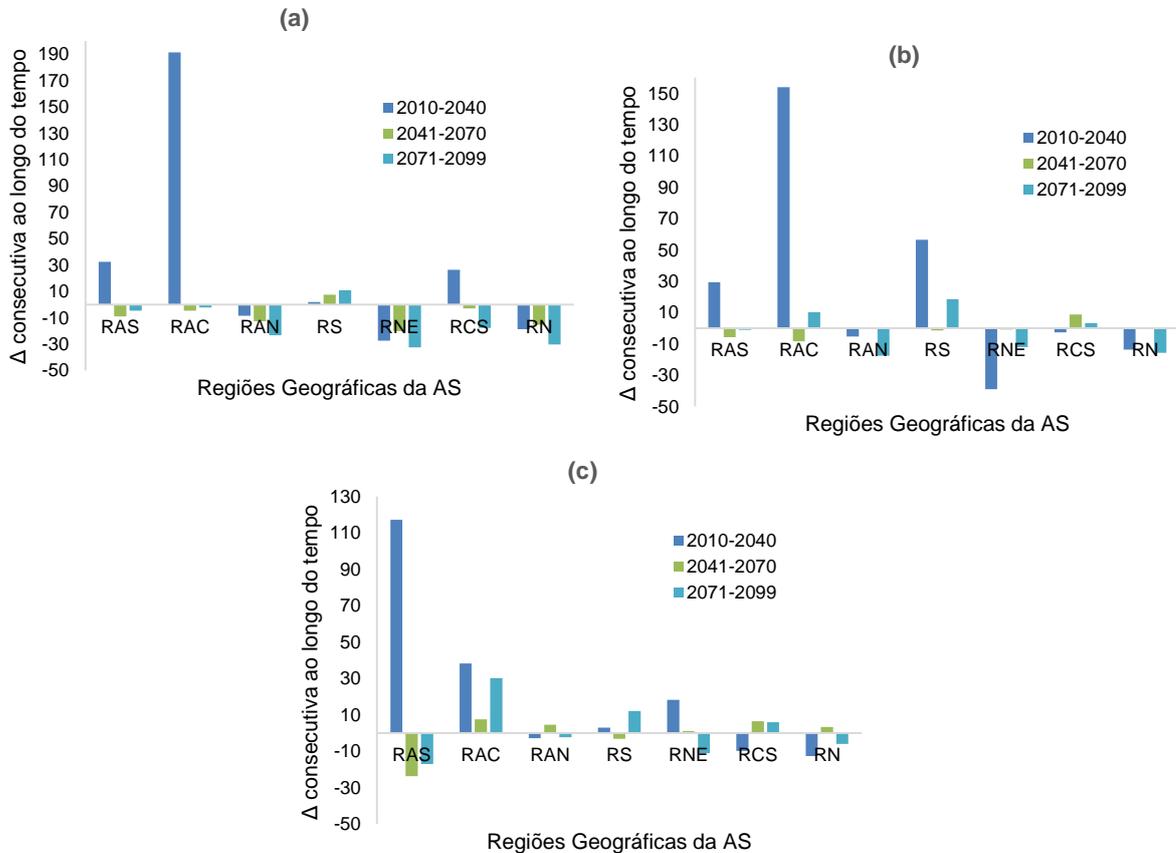


Figura 19: Variação consecutiva da precipitação ao longo do tempo (%) para o RCP8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Contudo, para as regiões RS e RCS, os modelos projetaram mudanças discrepantes quanto ao futuro da precipitação. Cabe destacar que as variações mais acentuadas foram projetadas pelo modelo Eta-CaNESM2. O modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta variações intermediárias para todos os períodos, enquanto que o modelo Eta-MIROC5 simula mudanças inferiores quanto ao comportamento futuro da precipitação para o cenário RCP8.5.

Os modelos divergem quanto ao comportamento futuro da precipitação para os RCPs4.5 e 8.5, aumentando a incerteza. O modelo Eta-CaNESM2 se destaca com maior magnitude na diminuição da precipitação na AS para os três períodos; para os demais modelos a mudança é mais moderada entre os cenários. Em relação ao aumento da precipitação, o período de 2010-2040 se destaca em todos os modelos para as regiões RAS e RAC, e também para as regiões que apresentaram redução, tais como RAN, RN e RNE, acentuando-se no período 2071-2099. O RCP8.5 indica maior divergência espacial entre os valores médios de precipitação simulados,

sugerindo que, nesse cenário, há uma maior incerteza em relação ao comportamento dessa variável no futuro.

4.3 Modelagem do fator R para a América do Sul

O modelo ajustado para estimativa do fator R para a AS está apresentado na tabela 1, com a estimativa dos parâmetros bem como respectivas significâncias estatísticas.

Tabela 1: Estimativa dos parâmetros do modelo para o fator R e suas características estatísticas.

Variável	Parâmetro estimado	Desvio dos parâmetros estimados (\pm)	Prob > t
Intercepto	0,27530	0,45657	0,5470
LO	0,02266	0,00231	< 0,0001
LO x LA	-0,00017067	0,00002814	< 0,0001
A x P	$6,049663 \cdot 10^{-8}$	$2,545327 \cdot 10^{-8}$	0,0181
LN (P)	0,65773	0,05551	< 0,0001

Observa-se que todas as estimativas dos parâmetros do modelo foram significativas a 5% de probabilidade pelo teste t de Student, mostrando que essas são explicativas do fator R. O modelo apresenta um R^2 ajustado de 0,63; r de 0,62; RMSE de 0,37 e CV de 10,9% o que significa um modelo com boa capacidade preditiva (Mello et al. 2013). Na figura 20 apresenta-se a dispersão dos valores estimados pelo modelo ao redor da reta 1:1.

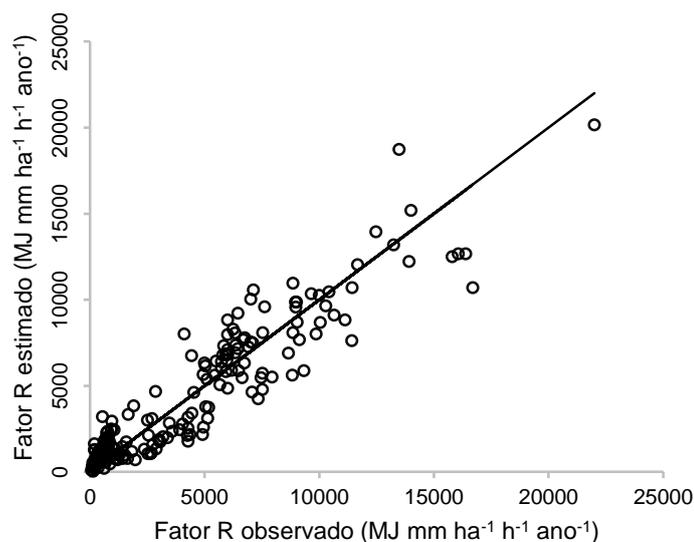


Figura 20: Dispersão dos valores do fator R estimados pelo modelo ajustado ao redor da reta 1:1.

Verifica-se que o modelo produziu estimativas com boa distribuição ao redor desta, sem identificação de tendência significativa, além de boa precisão dada pela proximidade dos dados em relação à reta 1:1.

Contudo, pode-se observar alguns comportamentos específicos produzidos pelo modelo; para valores menores que $1000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o modelo produziu uma tendência de superestimativa, enquanto que entre 1000 e $5000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, tendência de subestimativa dos valores. Para valores entre 5000 e $10000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o modelo apresentou predominância de superestimativa. É importante destacar que estes comportamentos não prejudicam o desempenho do modelo uma vez que essas tendências são de pequena expressão. É relevante destacar ainda a complexidade da modelagem do fator R na AS, a qual é dominada por extensas e elevadas cadeias de montanhas, a maior floresta equatorial do planeta, regiões desérticas e semiáridas (Atacama, Chile; Nordeste do Brasil) e diversos tipos climáticos afetados por diferentes fenômenos climáticos em macro e mesoescalas, e por convecção, na pequena escala, tornando a modelagem baseada apenas na latitude, longitude, altitude e precipitação média uma difícil tarefa. Assim, tendo em vista o desempenho do modelo ajustado, pode-se classificá-lo como adequado para estimativas do fator R na AS, inclusive sua aplicação usando valores médios de precipitação futura a fim de prever comportamento do fator R ao longo do século XXI.

Na figura 21 apresenta-se o mapa do fator R desenvolvido para a AS a partir da aplicação do modelo geográfico, com resolução espacial de 90 m e subdividido em 18 classes a fim de abranger os diferentes gradientes geográficos e climáticos do continente Sul Americano. A média do fator R para a AS é de $4482 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, mediana $4340 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com grande variabilidade, demonstrada pela desvio padrão de $4528 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

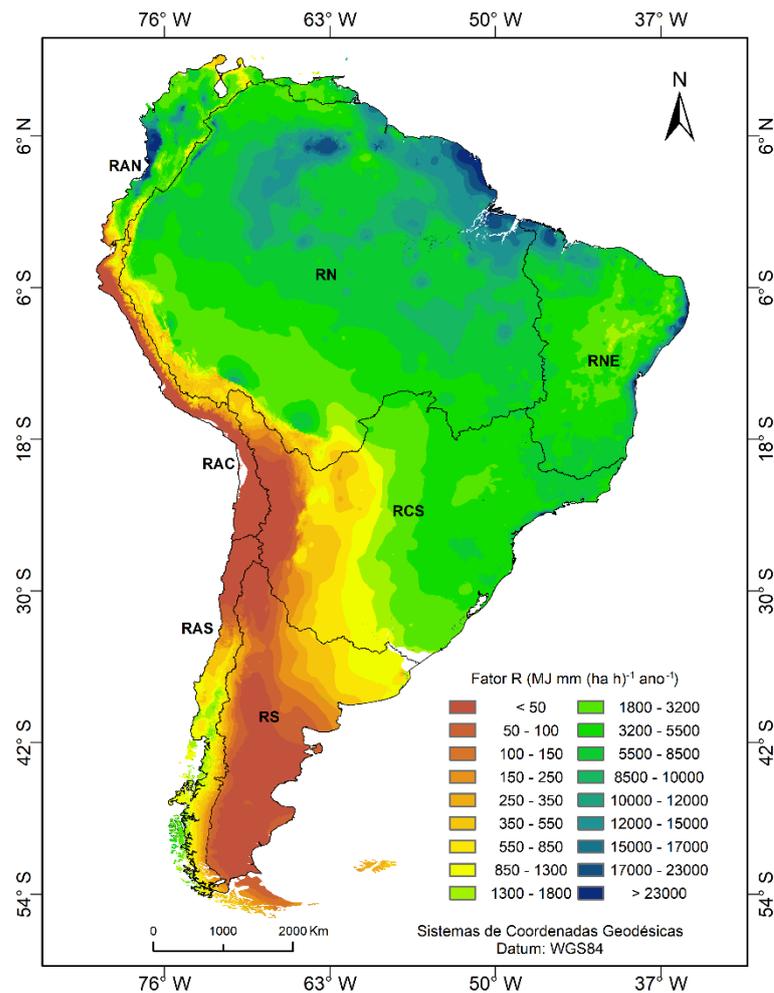


Figura 21: Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS obtido a partir das normais climáticas no período de 1961-1990.

Com base neste mapa, os valores mais elevados estão localizados nas bacias hidrográficas da região RN, superiores a $10000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$, com algumas áreas desta região apresentando valores acima de $20000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$. A RN da AS é afetada pela grande presença de umidade na região amazônica bem como pela ZCIT, que atua nas regiões RN e RNE da AS. Os menores valores foram encontrados para as regiões RAC e RS que contempla a porção sul da Argentina e região central do Chile, com valores inferiores a $250 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Valores compreendidos entre 250 a $1300 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$ se encontram distribuídos no nordeste da Argentina, região ocidental do Paraguai e parte da RCS da AS.

Considerando o valor médio anual nas regiões geográficas, na tabela 2, observa-se que o fator R mais elevado foi obtido para a RN com $6761 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e o menor valor para as regiões RAC e RS, com 139 e $230 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 2: Média do fator R por Região Geográfica na AS.

Região Geográfica	Fator R (MJ mm (ha h) ⁻¹ ano ⁻¹)	País
RAS	666	Chile
RAC	139	Equador, Chile, Peru
RAN	5212	Equador, Colômbia, Venezuela
RS	230	Argentina
RNE	5617	Brasil
RCS	2508	Brasil, Uruguai, Bolívia, Argentina, Paraguai
RN	6761	Brasil, Guiana, Guiana Francesa, Suriname, Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Bolívia

Ao analisar a Figura 21, é possível visualizar o gradiente espacial do fator R, no sentido sudoeste-nordeste, acompanhando o comportamento da precipitação média (Figura 2); inicia-se com valores mais elevados numa pequena faixa no extremo sul do continente, seguido de uma redução significativa no centro-norte da Argentina e Chile, aumentando em direção ao centro da AS (Centro-Oeste e Sudeste do Brasil) e finalmente, redução no extremo nordeste da AS (Nordeste do Brasil).

Essa variabilidade espacial do fator R acompanha a distribuição espacial da precipitação na AS, onde para máximos de precipitação encontram-se também valores elevados do fator R. O fator R médio por país está apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Média anual do fator R por país na AS.

País	Fator R (MJ mm (ha h) ⁻¹ ano ⁻¹)
Argentina (AR)	484
Bolívia (BO)	1701
Brasil (BR)	6407
Colômbia (CO)	7072
Chile (CL)	666
Equador (EC)	3041
Guiana (GY)	9496
Guiana Francesa (GY FR)	17783
Paraguai (PY)	1941
Peru (PE)	2246
Suriname (SR)	12193
Uruguai (UY)	2083
Venezuela (VE)	7095

O menor valor foi obtido para a Argentina (484 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹), seguido do Chile (666 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹). Nesses dois países, especialmente ao Norte do Chile, Noroeste e Centro-Sul da Argentina, encontram-se as regiões mais áridas do continente, com precipitação irregular e com baixo total anual (<350mm/ano), influenciado pelo Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) e célula de Haddley (REBOITA et al. 2010). Os maiores valores foram obtidos para a Guiana Francesa

(17783 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹) e Suriname (12193 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹), uma vez que estão localizadas sob forte influência do regime pluvial da região Amazônica, caracterizada por grandes volumes precipitados, normalmente superiores a 2000 mm/ano (REBOITA et al. 2010). Para os demais países, o valor médio da erosividade da chuva está compreendido entre 1700 e 9500 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, sendo a região central do Brasil caracterizada por valores entre 3000 e 8000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, região essa classificada por duas estações bem definidas, uma seca e outra úmida, que concentra mais de 80% da chuva (totais anuais entre 1200 e 1700mm/ano).

Resultados semelhantes foram encontrados por Panagos et al. (2017), mapearam o fator R para todo o planeta, com menores valores na Argentina e Chile, com máximos para a região RN da AS. Os autores ressaltaram a influência da Cordilheira dos Andes, a altitude na região Central e litorânea do Sudeste do Brasil, o aumento da latitude de Norte a Sul no comportamento do fator R no continente. Cabe destacar, que este trabalho apresenta ganhos em termos de maior resolução espacial (90m para ~1km obtido por Panagos et al. (2017)) possibilitando melhor detalhamento do fator R médio anual na AS em função do número de classes adotado, bem como pelas projeções do comportamento do fator R ao longo do século XXI.

Bonilla e Vidal (2011) destacam a existência de gradiente na distribuição do fator R na região central do Chile; na Argentina, estudos desenvolvidos por Rojas e Conde (1985) e Gaitán, J et al., (2017) demonstraram um padrão geral de aumento do fator R na região centro-norte, sentido oeste para leste (a sotavento da Cordilheira dos Andes), com padrão inverso para latitudes maiores. Valores semelhantes foram encontrados neste estudo, assim como a distribuição do fator R conforme observado na Figura 21, o que reforça a boa capacidade preditiva do modelo e do mapa da Figura 21. Ruppenthal et al. (1996) obtiveram para o sudoeste da Colômbia média de 5100 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹ para a localidade de Mondomo; neste estudo foi obtido 4600 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹ para esta mesma área.

Para o Brasil, vários estudos foram desenvolvidos com aprimoramento dos métodos para melhor capturar a distribuição do fator R no país, dos quais destacam-se os estudos de Mello et al. (2013; 2015), os quais caracterizaram um padrão na distribuição da erosividade de Sul a Norte do país, acompanhando a latitude, com máximos na RN (latitudes baixas) e mínimos na região do Nordeste, e valores intermediários no Centro-Oeste, Sudeste e Sul (latitudes maiores). Este comportamento também foi observado por Silva (2004), em estudo pioneiro sobre o

mapeamento do fator R para o Brasil. Hoyos et al., (2005) reportam na Cordilheira Ocidental Andina um desempenho semelhante ao obtido no presente estudo, dos quais menores valores do fator R estão associados às maiores altitudes, enquanto elevados valores de erosividade vinculados com menores altitudes. Correa et. (2016), estudando o fator R para a bacia do rio Mantaro, Peru (RAC), obtiveram resultados semelhantes, sendo que quanto mais próximo da região amazônica, maior a erosividade da chuva e quanto maior a altitude, menor o fator R. Contudo, este comportamento não foi observado por Ochoa et. al. (2016), onde o fator R para a região sudeste da Cordilheira Equatoriana a altitude não afetou o comportamento do fator R, mas sim a localização próxima às barreiras montanhosas e pela proximidade com os corredores que transportam umidade.

É possível encontrar padrões com elevados valores do fator R relacionados com maiores índices de precipitação no continente, especialmente na região Amazônica, cujos totais anuais podem superar facilmente 2000 mm, exercendo influência sobre a precipitação regional (MARENGO; NOBRE, 2009). Assim também, os maiores padrões de precipitação encontrados na Figura 2a coincidem com os padrões de precipitação encontrados por Zipser *et al.* (2006), os quais são atribuídos às chuvas convectivas isoladas com alto potencial erosivo na AS em zonas áridas e semiáridas da Argentina, no oeste da Amazônia e na ZCIT.

É importante realçar que extensas áreas da AS são dedicadas ao agronegócio, especialmente nas regiões centro-sul do Brasil, sudeste do Paraguai e centro-norte da Argentina, as quais estão entre os maiores produtores de grãos do mundo. Estas regiões necessitam de amparo técnico-científico em várias vertentes, especialmente no tocante à conservação dos solos e da água, que são seus insumos fundamentais. Muitas dessas regiões vem apresentando altas taxas de perda de solos devido às atividades agrícolas e aos eventos de chuva, já que se encontram em áreas com potencial mediano, no contexto geográfico da AS, para provocar erosão. Assim, entende-se que o mapa apresentado na figura 21 pode ser uma ferramenta estratégica para aperfeiçoar técnicas conservacionistas para preservação do solo agricultável destas regiões.

4.4 Análise de desempenho dos modelos climáticos globais na estimativa do fator R

Na Figura 22 estão apresentados os mapas do fator R para a AS para o tempo presente, gerados a partir das projeções dos modelos climáticos e posterior aplicação do modelo para o fator R.

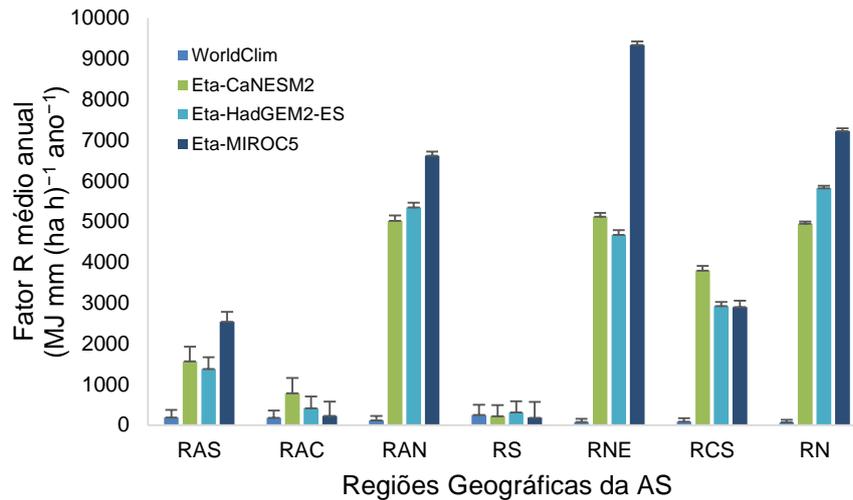


Figura 22: Fator R médio ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para as regiões geográficas da AS (colunas coloridas) estimado com base nas condições médias atuais de precipitação (WorldClim) e simulado pelos modelos climáticos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 aplicando dados médios simulados de precipitação anual entre 1961 e 2005 (tempo presente). Barras de erro representam o coeficiente de variação e por consequência, a variabilidade das estimativas.

Pode-se observar que os modelos simularam de forma razoável o mapa do fator R quando confrontado àquele gerado a partir da precipitação média observada (Figura 21). Observa-se na Figura 22 que os valores mais elevados estão concentrados nas regiões RAN, RN e RNE, assim como observado na Figura 21. Destaca-se que o modelo Eta-MIROC5 superestimou o fator R nestas regiões e também para a região RAS. Entretanto, para as regiões RAC e RS, observam-se valores médios inferiores a $600 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo este desempenho similar ao observado na Figura 21 e ocorre em decorrência dos baixos níveis de precipitação simulados pelos modelos. Para as regiões RN e RNE, todos os modelos projetam valores mais elevados do fator R. Na sequência, a RAN apresenta média superior a $5000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, destacando-se o mesmo comportamento do mapa da Figura 21, ou seja, os valores mais elevados da AS, seguido pela região RN. A região RCS apresenta média superior a $2500 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com superestimação projetada especialmente pelo modelo Eta-CaNESM2, com resultados superiores a

3700 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹. Cabe destacar que este modelo apresenta resultados mais elevados na projeção da precipitação para esta região no tempo presente.

No tocante à variabilidade dos dados, as regiões RAS, RAN e RNE apresentaram as maiores diferenças, no entanto, a menor variação desses foi observada na RS. Cabe destacar ainda que essa variabilidade acentuada dos dados ocorre somente para a RAS, como demonstrado na Figura 3 em relação à distribuição da precipitação na AS.

Na figura 23 observa-se o desempenho dos modelos na projeção do fator R para AS.

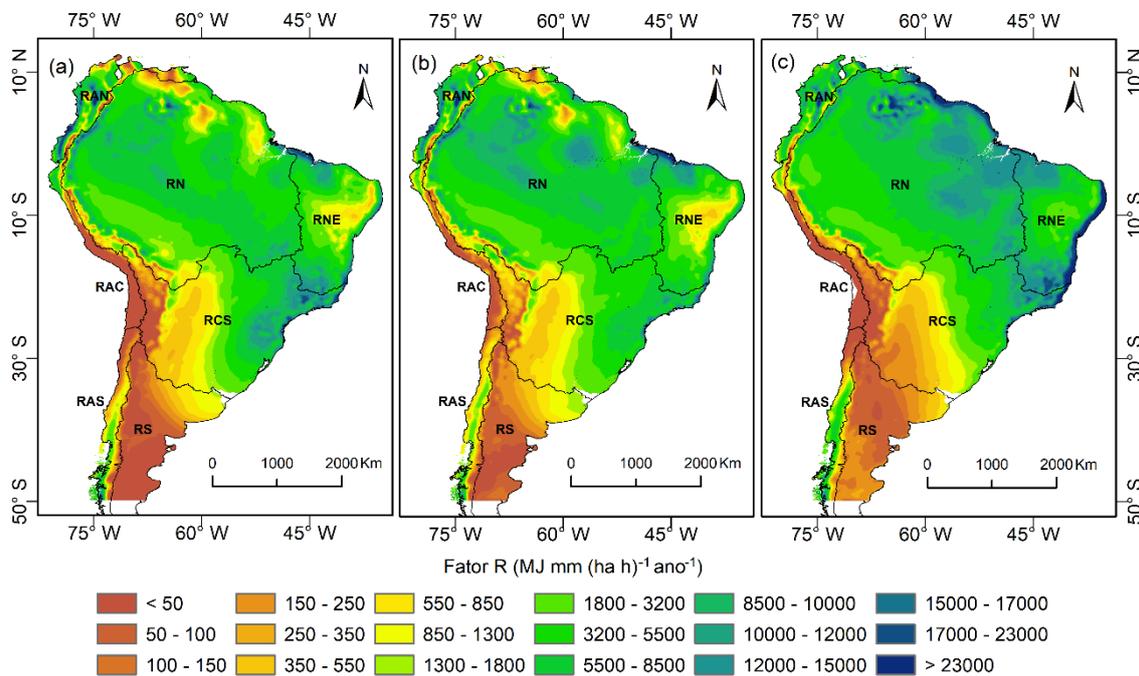


Figura 23: Mapa do fator R para a AS (tempo presente) com base nos modelos Eta-CANESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c).

Em relação à distribuição espacial do fator R na AS, observada na Figura 23, o desempenho dos modelos climáticos em projetar o fator R para a AS, em termos gerais, está adequado. Como pode-se analisar, tanto o modelo Eta-CaNESM2 quanto o Eta-HadGEM2-ES capturam de maneira semelhante a distribuição do fator R em relação ao mapa da Figura 21, com exceção da RNE, onde subestimaram os valores. Contudo, com base no modelo Eta-MIROC5, foi possível representar melhor a RN, especialmente nas áreas mais afetadas pela ZCIT. No entanto, no litoral do Nordeste e na linha de influência da ZCAS, este modelo superestima de forma considerável os valores do fator R. Para a RS da AS, os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES subestimam o comportamento do fator R, no entanto, o modelo Eta-CaNESM2

apresenta maior similaridade com o mapa base (Figura 21). Nas demais regiões, especialmente naquelas produtoras de grãos mencionadas anteriormente (centro-sul do Brasil, sudeste do Paraguai e centro-norte da Argentina), vinho (região central do Chile e centro-oeste da Argentina), e café (sudeste do Brasil e noroeste da Colômbia), o comportamento espacial se mostra semelhante entre os modelos.

Os coeficientes de correlação entre os mapas simulados pelos modelos climáticos e o mapa do fator R atual são superiores a 0,90 conforme figura 24, ou seja, os modelos climáticos foram capazes de simular o fator R para a AS.

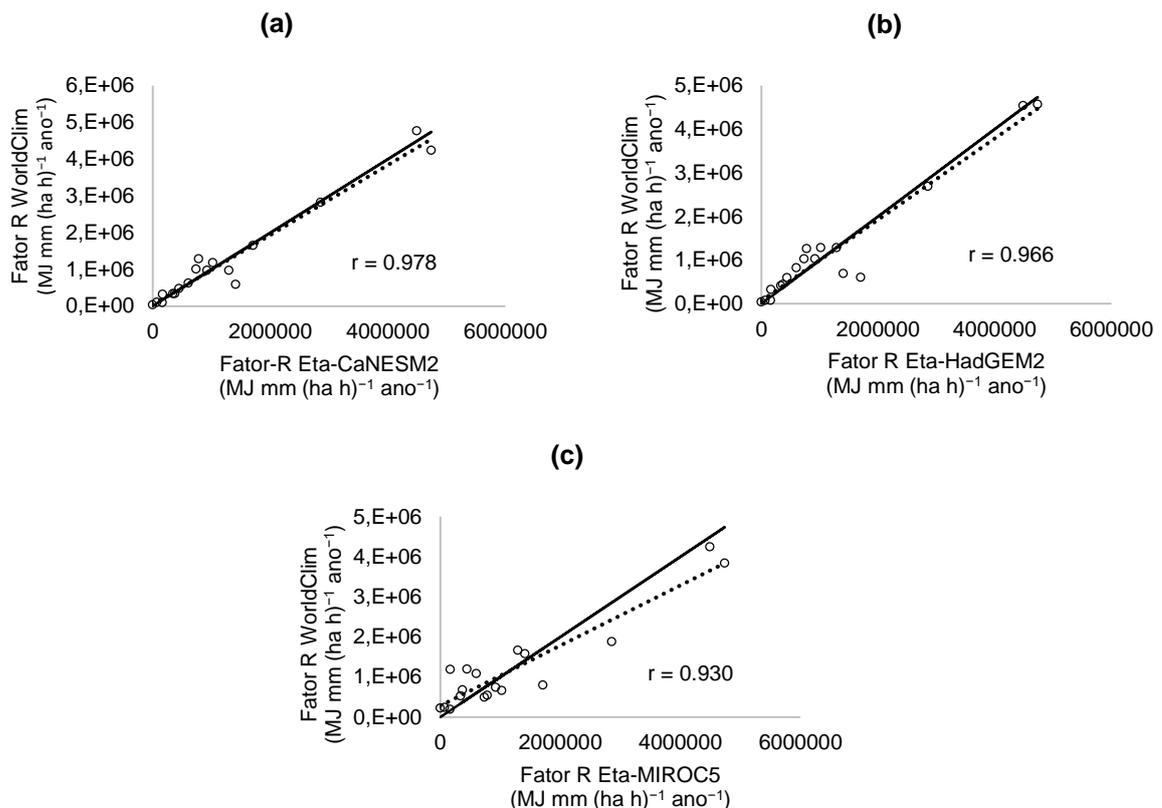


Figura 24: Comparação estatística do fator R ao redor da reta 1:1, estimados pelos modelos Eta-CaNESM2 (a), Eta-HadGEM2-ES (b) e Eta-MIROC5 (c) para o tempo presente em função ao fator R WorldClim.

Assim, estão aptos a desenvolver projeções futuras sobre o comportamento deste fator para o continente. Os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES apresentaram melhor desempenho, especialmente o primeiro, enquanto que novamente, o modelo Eta-MIROC5, apresentou resultado estatisticamente inferior. A comparação estatística na figura 24 foi realizada comparando pixel a pixel dos mapas, onde realizou-se uma reclassificação dos valores agrupados em classes adotadas previamente na simbologia dos mapas do fator R (ferramenta reclass disponível no ArcGIS, versão 10.1 (ESRI, 2014)) totalizando 18 classes, que correspondem aos 18

pontos para cada gráfico. Cabe destacar que foi seguido o mesmo procedimento na geração da figura 5.

4.5 Projeção do fator R ao longo do século XXI para AS

Para os RCPs 4.5 e 8.5, são apresentadas as projeções, para cada período, do fator R pelos MCG, com regionalização pelo Eta com resolução espacial de 20km para a AS.

4.5.1 RCP 4.5

Na figura 25 observa-se o fator R médio e a variação em relação ao tempo presente.

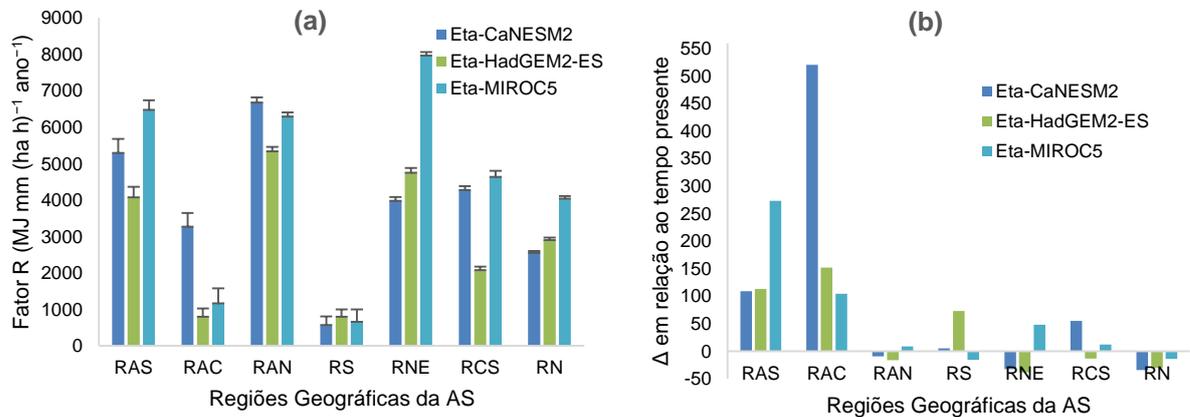


Figura 25: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulado pelos modelos com base nos modelos climáticos para as regiões da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2010-2040 (b). RCP 4.5.

Para o período 2010-2040, observa-se pela figura 25a que os modelos climáticos simularam o fator R de forma diferenciada. O modelo Eta-MIROC5 projeta aumentos expressivos para as regiões RNE, RN e RAS em relação aos demais modelos. O modelo Eta-CaNESM2 simula valores elevados para as regiões RAC, RAN e RCS. O modelo Eta-HadGEM2-ES, por sua vez, projetou valores intermediários entre os outros 2 modelos para a AS. A região com menor fator R, simulado por todos os modelos, foi a RS, com o maior valor médio aproximadamente de $800 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, projetado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. O maior valor médio do fator R foi simulado para a RNE da AS, com média superior a $7900 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, simulado pelo modelo Eta-MIROC5.

Quanto à variabilidade das estimativas, as regiões RAS, RAN e RNE apresentaram maior dispersão dos dados, e menor dispersão para a RS. No entanto,

para as regiões RNE e RN, os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES projetaram diminuição significativa do fator R na ordem de 33% e 38%, respectivamente, enquanto o modelo Eta-MIROC5 simulou aumento importante de 48%, caracterizando incerteza devido ao comportamento diferenciado dos modelos. Igualmente, para a RN, os modelos projetaram diminuição do fator R de 34%, 30% e 14%, respectivamente, pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, mostrando que a tendência de redução do fator R é a hipótese mais plausível nas condições do RCP 4.5. Para as regiões RAS e RAC, o aumento mais importante, em relação ao tempo presente, foi projetado pelo modelo Eta-MIROC5, na ordem de 273%; para a RAC, o modelo Eta-CaNESM2 simulou aumento aproximado de 521% nesse período.

O comportamento apresentado acima também pode ser observado na forma de mapas do fator R, conforme figura 26, onde as simulações ainda preservam a existência dos gradientes do fator R observados no tempo presente.

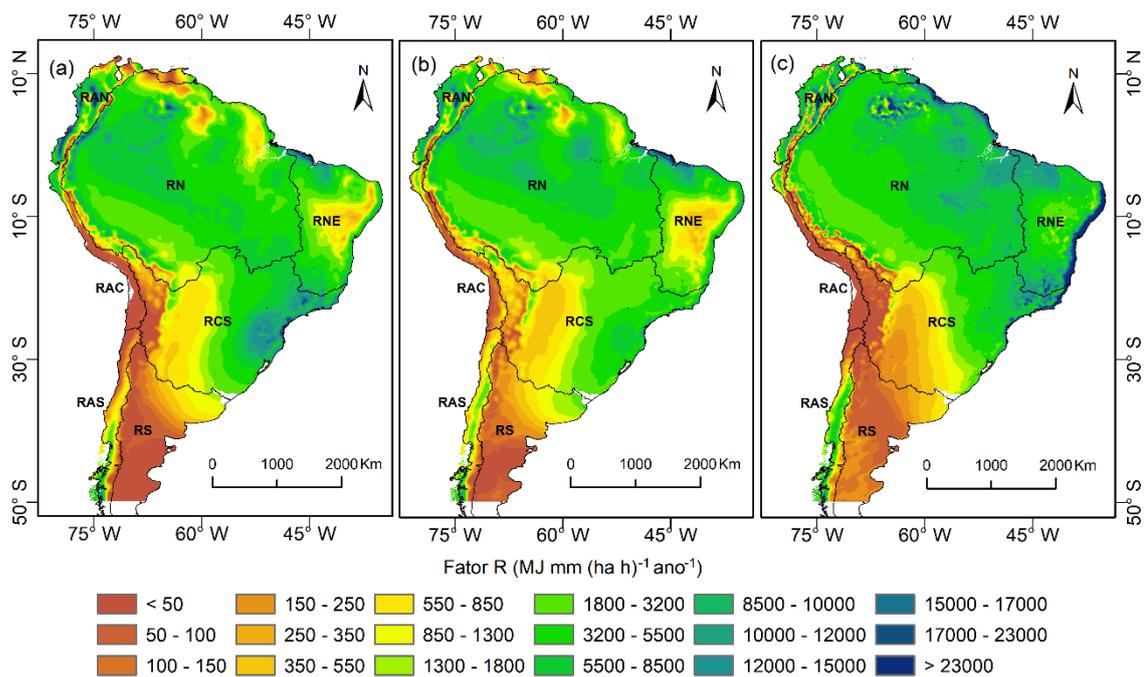


Figura 26: Mapas do fator R para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

É possível verificar semelhança nas simulações entre os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES. Como visto, há uma possível diminuição do fator R na RNE e extremo Norte da AS, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 simulou aumento nessas regiões assim como no extremo Sul da AS. O mesmo padrão é observado para o sudeste da RCS projetado pelo modelo Eta-CaNESM2, indicando possível

mudança nos padrões com aumento do potencial erosivo da chuva nessas áreas, contudo, os demais modelos não simularam alterações expressivas em relação ao tempo presente. Na região com intensa atividade agrícola da AS, especialmente centro-sul do Brasil, sudeste do Paraguai e centro-norte da Argentina, não se verifica variação significativa do fator R em relação ao tempo presente por nenhum dos modelos, indicando semelhança nas projeções e maior previsibilidade.

No período 2041-2070, as regiões RAS, RAN e RNE tendem a apresentar maior variabilidade do fator R, enquanto a região RS, menor variabilidade (Figura 27a), sendo este comportamento similar ao observado no período anterior.

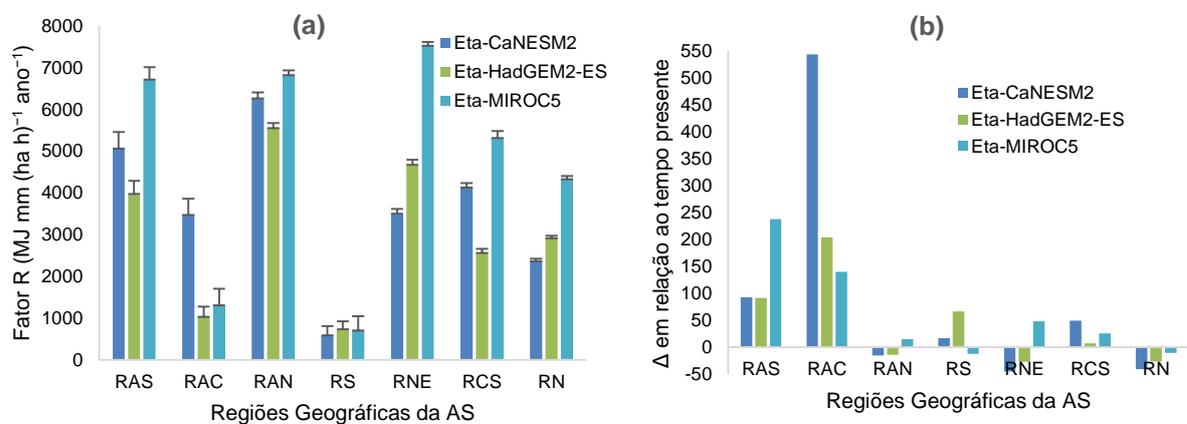


Figura 27: Fator R (MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos climáticos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente para o período 2041-2070 cenário RCP 4.5 (b).

Para algumas regiões geográficas da AS, os modelos projetaram mudanças mais expressivas, com o Eta-MIROC5 projetando maiores valores para a RNE de 7500 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹ e o modelo Eta-HadGEM-ES projetando os menores para RS, com média de 730 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹.

Em relação à variação do fator R com o tempo presente (Figura 27b), os modelos projetaram diminuição para as regiões RNE, RN e RAN, exceto o modelo Eta-MIROC5 que projetou aumento do fator R para as regiões RAN e RNE. Para as regiões RS e RCS, os modelos simularam aumento do fator R, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou diminuição para a RS. Quanto aos aumentos mais expressivos projetados, estes foram observados para as regiões RAC e RAS, na ordem de 543% e 237%, simulados, respectivamente, pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-MIROC5.

A distribuição espacial do fator R na AS para o período 2041-2070 pode ser visualizada por meio dos mapas apresentados na figura 28, onde observa-se diminuição do fator R na RNE e no extremo Norte da AS, projetado pelos modelos

Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM-ES. O modelo Eta-MIROC5 projetou aumento nessas regiões assim como para o extremo Sul da AS.

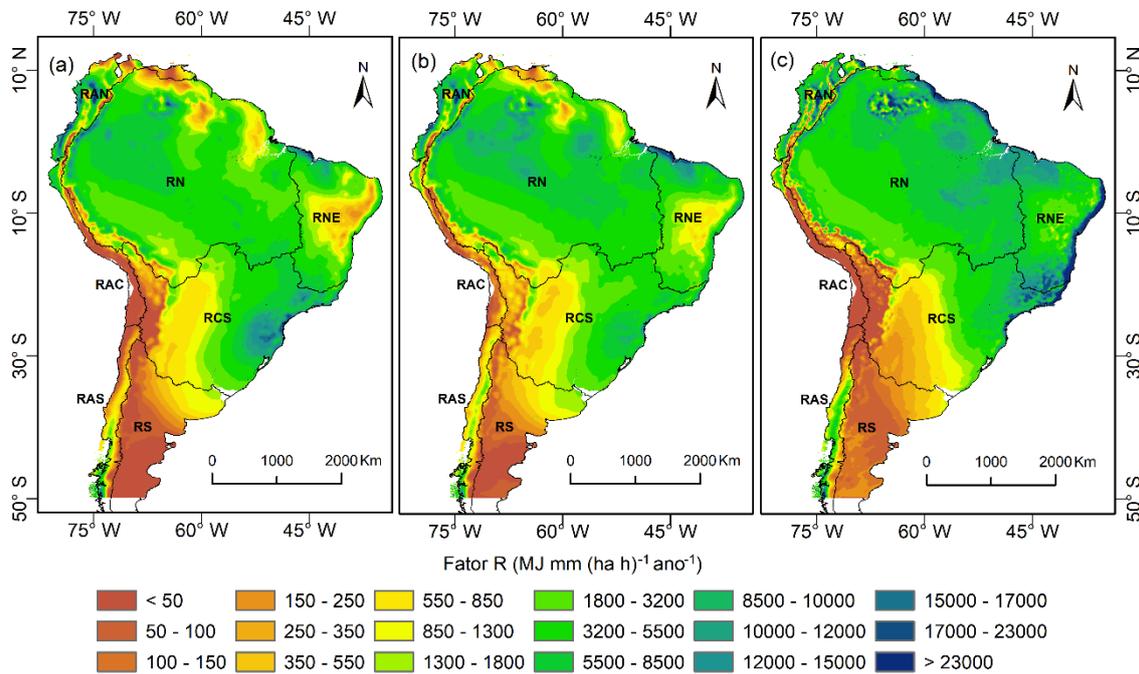


Figura 28: Mapas do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2041-2070 e cenário RCP 4.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Para o sudeste da RCS também observa-se aumento do fator R simulado pelo modelo Eta-CaNESM2, indicando possível variação nos padrões de comportamento do poder erosivo das chuvas nesta região da AS. Na região com alta atividade agrícola da AS, o gradiente do fator R se mantém sem alterações importantes, à semelhança com a distribuição do fator R para o período anterior. Contudo, os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM-ES apresentaram maior semelhança entre si, enquanto que o modelo Eta-MIROC5 realizou projeções com comportamento diferenciado para o fator R para a região com alta atividade agrícola, de forma semelhante ao verificado nos mapas anteriores.

Para o período de tempo 2071-2099 (Figura 29), o fator R apresenta comportamento semelhante aos períodos anteriores, não havendo variação significativa nas projeções feitas pelos modelos. Em relação à variabilidade dos dados, as regiões RNE, RAN e RAS apresentaram maior variabilidade do fator R (Figura 29a). No entanto, a RS segue apresentando menor variabilidade, seguida pela RAC, ressaltando que este comportamento dos dados se mantém sem alterações importantes em relação aos períodos anteriores com o cenário RCP 4.5. Assim, os valores extremos projetados foram: para a RS, com o modelo Eta-HadGEM-ES

projetando média de 780 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹ e para a RNE, com o modelo Eta-MIROC5 projetando média superior a 8000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹.

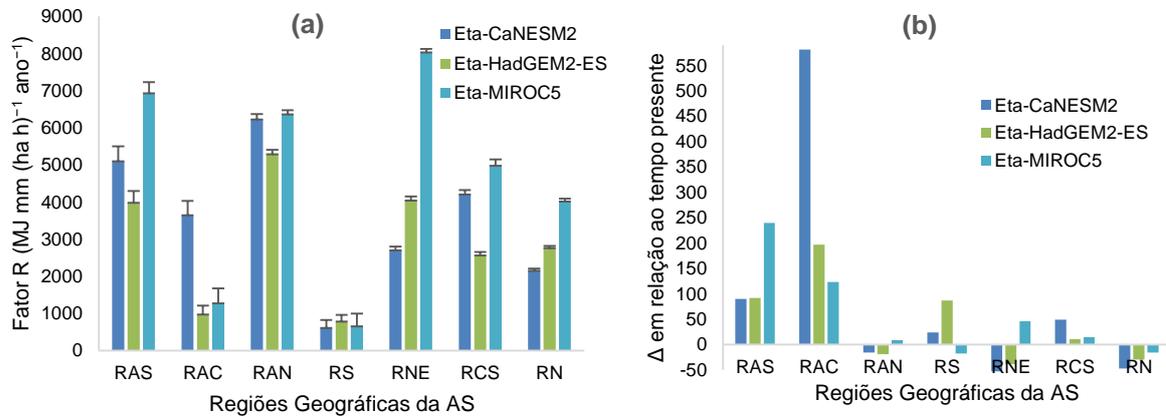


Figura 29: Fator R (MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período 2071-2099 (b). RCP 4.5.

Em referência às diferenças do fator R relacionadas ao tempo presente, os modelos coincidem na projeção de aumento para as regiões RAS, RAC e RCS, com aumento de 240% do fator R para RAS e elevação superior a 500% para RAC, simulados pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-CaNESM2, respectivamente (Figura 29b). Também, para a RS os modelos projetam aumentos, na ordem de 87% simulado pelo modelo Eta-HadGEM-ES, não obstante o modelo Eta-MIROC5 projeta redução na ordem de 17%. Contudo, para a RN, as simulações mostraram comportamento semelhante quanto às projeções futuras, com diminuição de até 47%, simulada pelo modelo Eta-CaNESM2. De maneira similar, os modelos simularam diminuição para as regiões RAN e RNE, porém, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumentos para ambas as regiões, com maior impacto para RNE, na ordem de 46%, refletindo em incertezas relevantes para as citadas regiões.

A distribuição do gradiente espacial do fator R na AS vem mantendo-se sem grandes variações nas projeções em relação aos períodos anteriores, porém, com valores reduzidos (<1000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹) no extremo norte da RN, RNE, RAC, sul e sudoeste da RCS, projetados pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES (Figura 30ab) e valores mais elevados do fator R distribuídos no sudeste da RCS, com base na projeção do modelo Eta-CaNESM2. O mesmo comportamento foi projetado para a RN, com o modelo Eta-HadGEM2-ES. As projeções feitas modelo Eta-MIROC5 (Figura 30c), demonstraram uma tendência de aumento do fator R na faixa de influência da ZCIT, costa do Nordeste e na região de influência da ZCAS na AS. Entretanto, para a região com alta atividade agrícola, os modelos Eta-CaNESM2

e Eta-HadGEM-ES apresentaram comportamento semelhante, diferenciando-se do modelo Eta-MIROC5, cujas projeções do fator R são mais elevadas. É importante mencionar que este comportamento se assemelha ao que foi verificado nos mapas relacionados ao tempo presente.

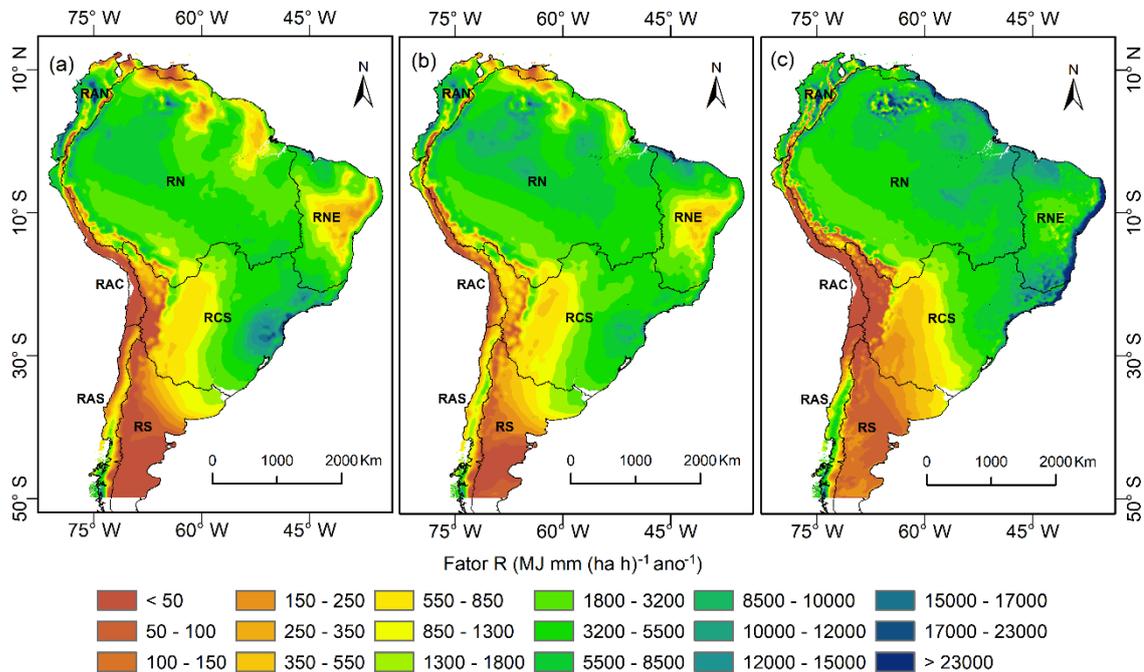


Figura 30: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Cabe destacar a relação entre a precipitação média anual e o fator R. Deste modo, pôde-se constatar projeção de redução da precipitação para a RN (período 2041-2070) acompanhadas de diminuição do fator R (22% e 41%) projetadas pelo modelo Eta-CaNESM2. Da mesma forma, para a RCS (período 2071-2099), o modelo Eta-CaNESM2 simula os maiores aumentos da precipitação e fator R para o mesmo período (218% e 581%, respectivamente). Para a RS, maiores aumentos para o período 2071-2099, (48% e 87%, respectivamente para precipitação e fator R) foram projetados pelo modelo Eta-HadGEM-ES e para RNE também se observa redução acentuada projetado pelo modelo Eta-CaNESM2 (período 2071-2099 com 40% e 53%). Para a RAS também se observa influência na projeção da precipitação e fator R (período 2010-2040 com elevação de 114% e 273% pelo modelo Eta-MIROC5, respectivamente, para precipitação e fator R) e finalmente para RCS há predominância de aumento da precipitação e fator R, o período 2010-2040, modelo Eta-CaNESM2 (27% e 55%, respectivamente).

De forma similar, é possível analisar os efeitos das mudanças climáticas sobre o fator R considerando a variação consecutiva ao longo do tempo. Logo, o comportamento geral da variação do fator R para o século XXI, cenário RCP4.5 (Figura 31) observa-se um padrão nas projeções para o período 2010-2040 caracterizado por variações mais acentuadas em relação ao tempo presente.

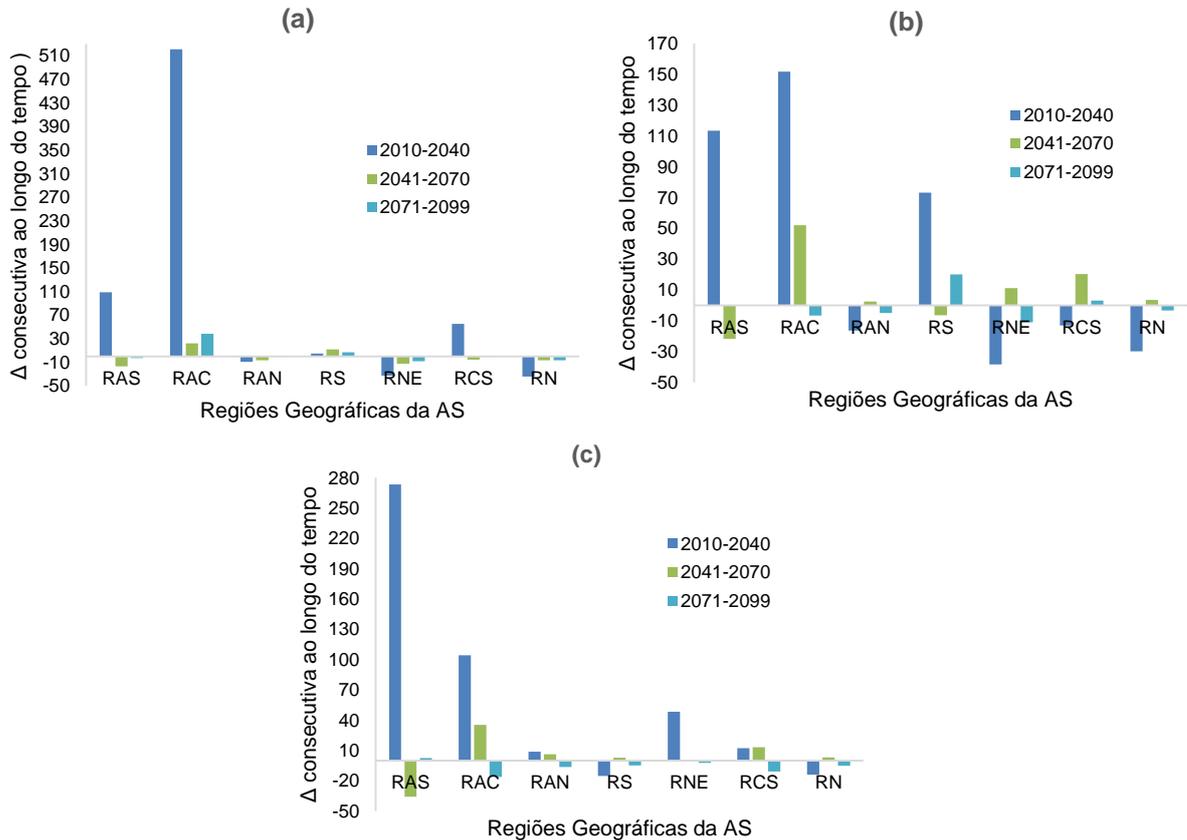


Figura 31: Variação consecutiva do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do tempo (%) para o RPC4.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Os modelos simularam variações expressivas para as regiões RNE e RN, com diminuição do fator R com base nos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, respectivamente, 45% e 27%. No entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento do fator R da ordem de 48% para a RNE. Para a RN, também se observa variação significativa para o período de tempo 2010-2040, com diminuição simulada pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, de 41% e 26%, respectivamente, e um ligeiro aumento pelo Eta-MIROC5, de 11%.

Para os demais períodos de tempo, nas regiões RNE e RN, as simulações projetaram diferenças importantes quanto ao comportamento do fator R. Para a RAS, os modelos apresentaram comportamento semelhante do fator R ao longo do século XXI, destacando-se aumento mais importante no período de tempo 2010-2040 pelo

modelo Eta-MIROC5 na ordem de 273%, seguido de 109% e 113% projetados pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, respectivamente. Para a RS, as variações projetadas entre os períodos de tempo tendem a compensar com variações pouco expressivas (<25%), exceto para a projeção feita pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, com aumento na ordem de 73%. Para a RAC, os modelos projetaram aumento, com maior impacto para o primeiro período (>500%) simulado pelo modelo Eta-CaNESM2, no entanto, os demais modelos simulam variação inferior a 210%.

No tocante às regiões RAN e RCS, os modelos projetaram comportamento do fator R com algumas discrepâncias entre os períodos, sendo estas as regiões com maiores incertezas para o RCP4.5. Algumas dessas discrepâncias entre os modelos são importantes uma vez que refletem na incerteza dos resultados, destacando-se:

- a) O modelo Eta-MIROC5 destaca-se como único modelo que projetou aumento do fator R para a RNE no primeiro período de tempo (2010-2040), sendo que os outros modelos simularam redução do fator R. Nos demais períodos de tempo, o modelo Eta-MIROC5 projetou variações pouco expressivas do fator R. Não obstante, o modelo Eta-CaNESM2 projetou diminuição para o período 2041-2099 e o modelo Eta-HadGEM-ES projetou aumento para o período 2041-2070 e redução do fator R para o período 2071-2099.
- b) Para a RN, os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM-ES coincidem no comportamento das projeções, com redução, seguido de aumento e para o último período novamente diminuição do fator R; o modelo Eta-CaNESM2 projetou redução para os três períodos, sendo o único a apresentar este comportamento para o fator R para o período 2041-2070 para esta região.
- c) O modelo Eta-CaNESM2 projetou diminuição para a RAN para o primeiro e segundo período de tempo, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento para ambos os períodos e redução para o período final do século XXI; de forma semelhante, o modelo Eta-HadGEM-ES projetou diminuição do fator R com diminuição máxima de 16%.
- d) Para a RCS, o modelo Eta-CaNESM2 projetou aumento na ordem de 27% para o período de tempo 2010-2040 e diminuição para segundo período, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento para ambos e redução para o período 2071-2099. Contudo, o modelo Eta-HadGEM-ES projetou diminuição, seguido de aumento para os dois últimos períodos de tempo, respectivamente.

Como exposto, as regiões RAN e RCS destacaram-se por apresentar as maiores discrepâncias quanto às projeções realizadas pelos modelos ao longo do século XXI, aumentando assim as incertezas quanto ao comportamento do fator R na AS.

4.5.2 RCP8.5

Para o RCP 8.5 são apresentados os valores do fator R projetados pelos modelos climáticos, separados por período de 30 anos e 29 anos até o final do século XXI. Na Figura 32 verifica-se o fator R médio e a variação em relação ao tempo presente no período 2010-2040.

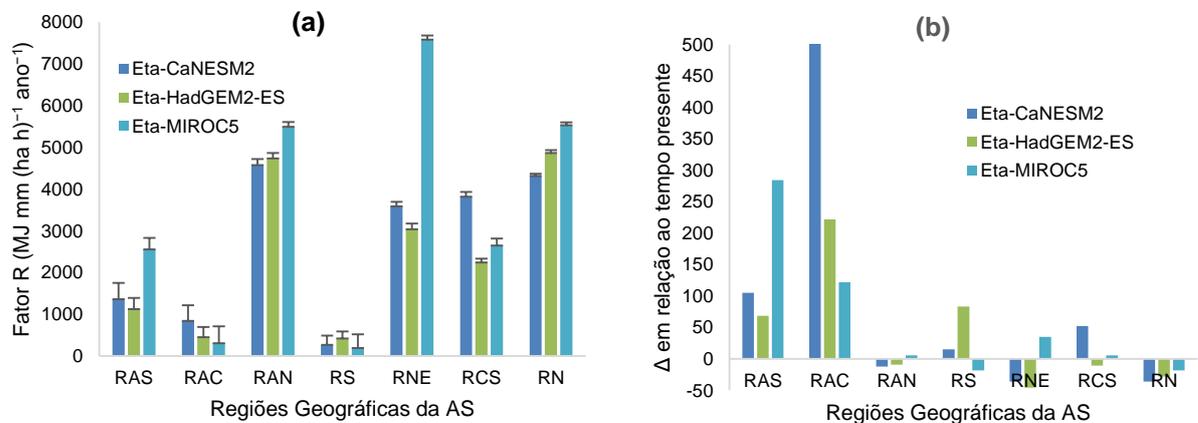


Figura 32: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período de 2010-2040 (b). RCP 8.5.

Para este período (Figura 32a) os modelos climáticos simularam o fator R de forma diferenciada. O modelo Eta-MIROC5 projetou aumentos expressivos para as regiões RNE, RN, RAN e RAS em relação aos demais modelos, mantendo a tendência observada no cenário RCP4.5. Da mesma forma, o modelo Eta-CaNESM2 simula aumentos importantes para as regiões RAC e RCS. A região com menor valor do fator R, com base em todos os modelos, foi a RS, com valores máximos de $422 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, projetado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. A região com maior fator R foi a RNE, com valores superiores a $7500 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, simulados pelo modelo Eta-MIROC5. Quanto à variabilidade do fator R, as regiões RAS, RAN e RNE apresentaram as maiores amplitudes.

Para as regiões RCS, RNE e RAN em relação ao tempo presente (Figura 32b), os modelos apresentaram incertezas quanto ao futuro devido à discrepância entre as projeções, simulando comportamentos distintos para uma mesma região. Deste modo, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento do fator R para as regiões RNE e

RAN enquanto os demais modelos simularam redução expressiva para as mesmas. Para a RCS, o modelo Eta-CaNESM2 projetou aumento expressivo do fator R, ao passo que o modelo Eta-HadGEM2-ES simulou diminuição e o modelo Eta-MIROC5, aumento, mostrando que não houve um comportamento padrão entre os modelos, aumentando a incerteza das projeções futuras para estas regiões. Não obstante, para as regiões RAN, RAS e RN, os modelos projetaram o fator R de forma similar para este período. Para a RN, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetaram redução do fator R, respectivamente, de 36%, 28% e 18%.

Para as regiões RAN e RAS, os modelos projetaram aumento do fator R, com maior impacto pelo modelo Eta-MIROC5 para a RAS (284%) e aumento na ordem de 503% simulado pelo modelo Eta-CaNESM2 para a RAC. Em referência à RS, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento expressivo (83%), no entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou redução (18%), demonstrando também para este cenário, incertezas nas projeções do fator R para a região sul da AS. A distribuição espacial do fator R, apresentada na forma de mapas, desenvolvida com base nos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 está apresentado na figura 33.

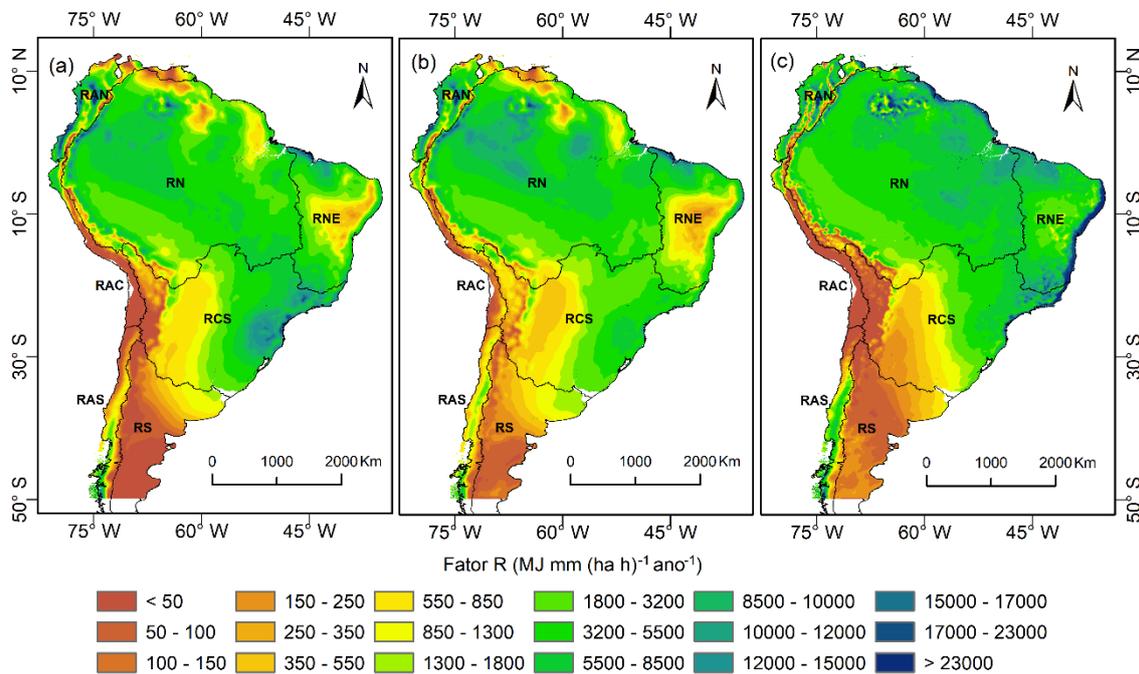


Figura 33: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo de 2010-2040, RCP 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

É possível verificar semelhança entre os mapas oriundos das simulações com os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES (Figura33ab), especialmente para as regiões RAS, RS, RAN, RN e RNE e valores do fator R inferiores a 1000 MJ mm (ha

$\text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Em relação ao modelo Eta-MIROC5, este projetou a distribuição do fator R de forma semelhante ao mapa da figura 21 (mapa do fator R atual), especialmente no Brasil, em áreas com valores superiores a $3000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

Foi possível observar diminuição do fator R na RNE e extremo Norte da AS, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou elevação do mesmo nessas regiões, assim como no extremo Sul da AS. Na parte leste/sudeste da RCS também observa-se aumento do fator R projetado pelo modelo Eta-CaNESM2 e Eta-MIROC5, indicando possível mudança nos padrões de chuva nesta região da AS, provavelmente associado ao aumento da concentração de chuvas ao longo do século XXI. Na região com expressiva atividade agrícola da AS (regiões centro-sul do Brasil, sudeste do Paraguai e centro-norte da Argentina), não há variação significativa entre os modelos. Ao se comparar com as projeções do RCP4.5, observa-se alterações pouco expressivas, especialmente dos valores extremos na distribuição do fator R na AS.

Na figura 34 observa-se o comportamento das simulações para os MCG em média e variação em relação ao tempo presente.

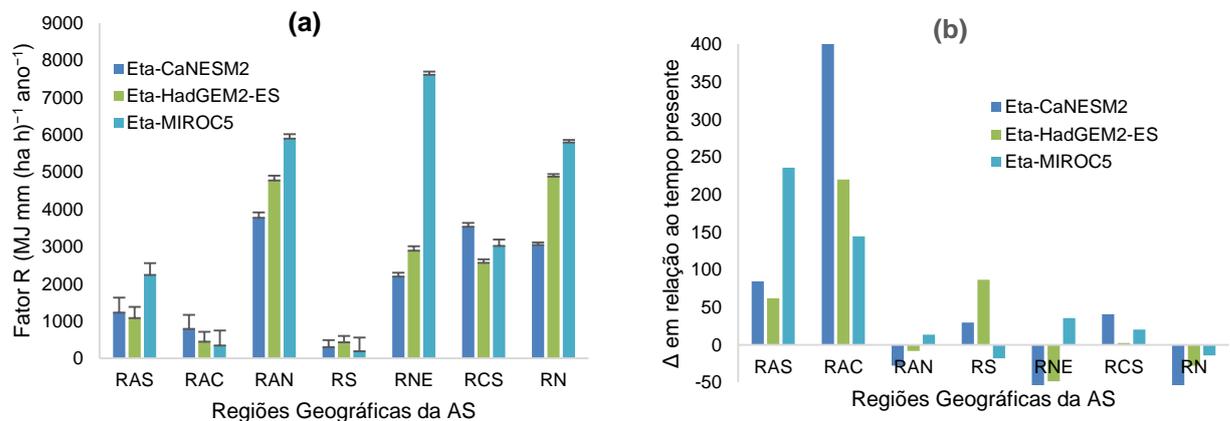


Figura 34: Fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e coeficiente de variação (em barras) simulado pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o período de tempo 2041-2070 (b). RCP 8.5.

Para o período de tempo 2041-2070 (Figura 34a), de forma geral, os modelos climáticos apresentaram padrões diferenciados entre eles, simulando o fator R de forma oposta para algumas regiões. O modelo Eta-MIROC5 projetou aumentos importantes para as regiões RNE, RN, RAN e RAS em relação aos demais modelos, assim como o modelo Eta-CaNESM2 para as regiões RAC e RCS. Em relação à variabilidade dos dados, as regiões RAS, RAN e RNE apresentaram maior amplitude, enquanto a RS, a menor. Para esta última, os modelos projetaram o menor fator R, com valores de $429 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$, projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES,

e maior elevação do fator R para a RNE, com valores superiores a 7600 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, simulados pelo modelo Eta-MIROC5, apresentando similaridade com o período de tempo anterior.

Para as regiões RCS, RNE e RAN, em relação ao tempo presente (Figura 34b), os modelos apresentaram comportamento distinto, simulando para uma mesma região geográfica aumentos, reduções e/ou amplitudes distintas. Assim, tem-se que o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento do fator R para as regiões RNE e RAN, respectivamente, de 35% e 13%, enquanto o modelo Eta-CaNESM2 simulou redução de 61% e 28%. Na sequência, para a RCS, os modelos projetaram aumento do fator R, de 41%, simulado pelo modelo Eta-CaNESM2. Para as regiões RAN, RAS e RN, os modelos apresentaram comportamento semelhante das projeções para este período. Para a RN, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetaram redução do fator R, respectivamente, de 55%, 28% e 14%. Para as regiões RAN e RAS, os modelos projetaram aumento do fator R, especialmente o modelo Eta-MIROC5 para a RAS (236%), o modelo Eta-CaNESM2 (468%). Em referência a RS, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento importante (86%), entretanto, o modelo Eta-MIROC5 simula redução (18%). Na figura 35 observa-se a distribuição do fator R nos mapas.

Quanto à distribuição espacial do fator R para o período de tempo 2041-2070, na Figura 35 estão apresentados os mapas deste fator gerados com base nos modelos climáticos. Observa-se semelhança entre os mapas gerados com base nos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES, com diminuição do fator R para a RNE e extremo Norte da AS, aumentando a área de abrangência com este comportamento em relação ao período anterior. Esse aumento foi mais pronunciado no modelo Eta-CaNESM2. Entretanto, o modelo Eta-MIROC5 simulou resultado distinto, projetando fator R superior a 1000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹. Contudo, o modelo Eta-MIROC5 (Figura 35c) projetou o mesmo padrão anterior nas citadas regiões, caracterizando aumento do fator R na faixa leste/sudeste da RCS, sendo que este comportamento também foi observado pelo modelo Eta-CaNESM2.

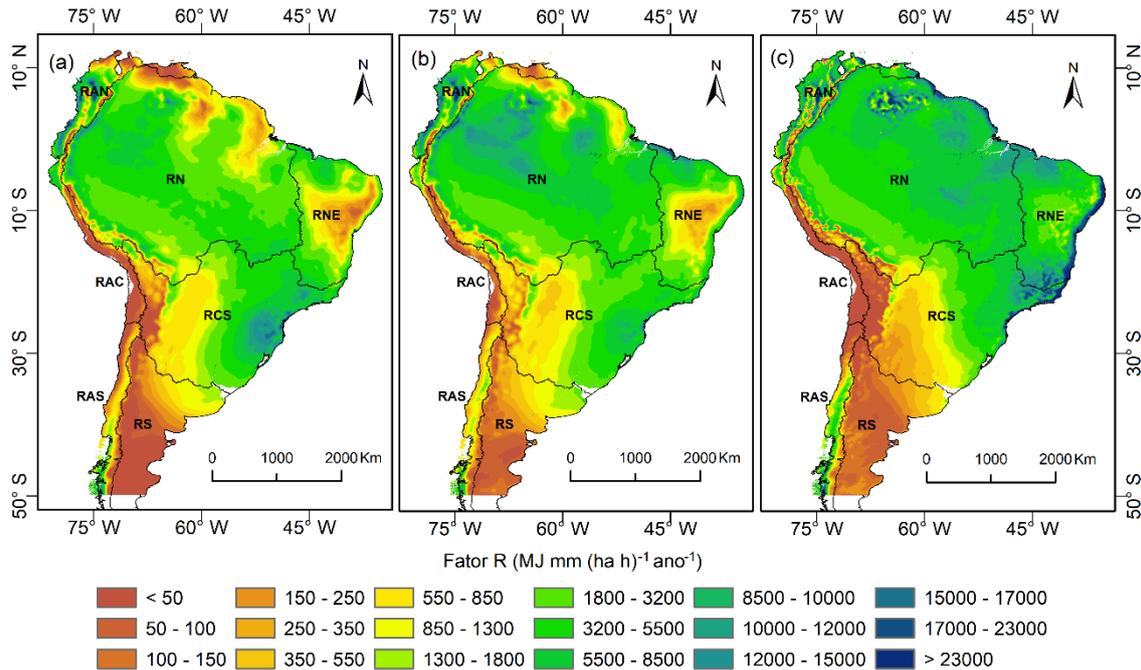


Figura 35: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2041-2070, RCP 8.5 (a. Eta-CANESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Para a RS, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetaram resultados (em média) para o fator R em torno de $500 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Na região com alta atividade agrícola da AS, não há variação significativa, enquanto que na RAC, foi observada diminuição do fator R, como consequência da redução do total precipitado médio anual.

Em relação ao período de tempo 2071-2099 (Figura 36), os modelos climáticos simularam o fator R na AS com mudanças mais acentuadas do que para o RCP4.5.

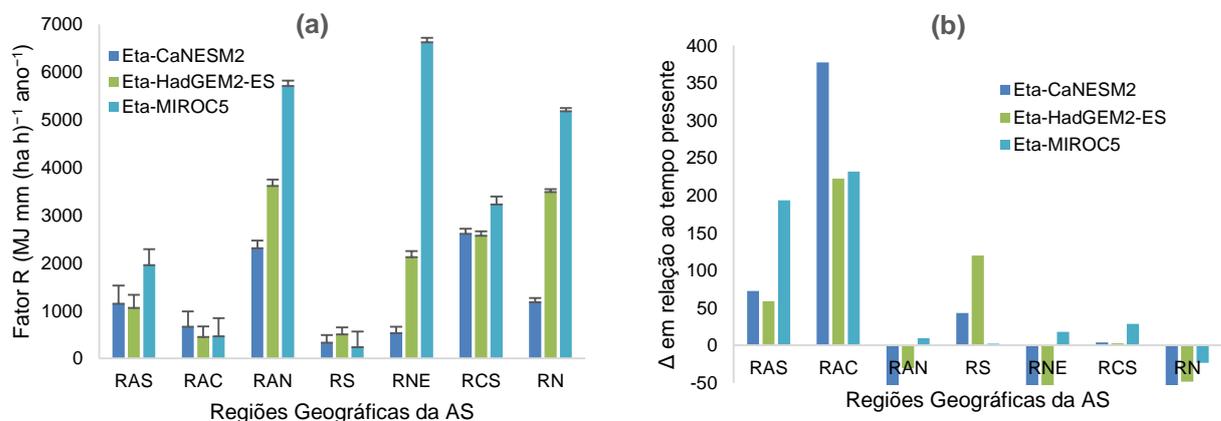


Figura 36: Fator R (MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹) e coeficiente de variação (em barras) simulados pelos modelos nas regiões geográficas da AS (a) e variação em relação ao tempo presente (%) para o tempo presente 2071-2099 (b). RCP 8.5.

Para RAC, o modelo Eta-CaNESM2 (Figura 36a) projetou médias máximas do fator R na ordem de $665 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. O modelo Eta-MIROC5 projetou aumentos expressivos para as regiões RNE, RN, RAN, RAS e RCS em relação aos demais modelos. Em relação à variabilidade dos dados, para as regiões RAS, RAN e RNE verifica-se maior amplitude, e da mesma forma que o período anterior, menor variabilidade para a RS. Para esta última, os modelos projetaram o menor fator R, com média máxima de $500 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. A maior elevação do fator R foi para a RNE, com média superior a $6600 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, projetado pelo modelo Eta-MIROC5, apresentando redução do fator R, como no período de tempo anterior.

Em relação ao tempo presente, para as regiões RNE e RAN (Figura 36b), os modelos projetaram com maior incerteza, apresentando padrões diferenciados entre os modelos. Reduções do fator R projetadas pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES e aumentos pelo modelo Eta-MIROC5, de forma semelhante aos outros períodos. Observa-se também alta variabilidade do fator R para essas regiões. O modelo Eta-MIROC5 projetou aumento do fator R para estas regiões de 18% e 9,5%, respectivamente, enquanto o modelo Eta-CaNESM2 simulou redução de 91% e 56%, respectivamente. Com base nestes resultados e naqueles apresentados anteriormente para diferentes períodos de tempo e cenário RCP4.5, essas regiões observou-se maiores incertezas no tocante ao comportamento do fator R para a AS. Na sequência, para a RCS, todos os modelos projetaram aumento, especialmente o modelo Eta-MIROC5 com elevação do fator R de 29%. Para essa região as projeções apresentaram comportamentos semelhantes, possivelmente com menores níveis de incerteza.

Para as regiões RAS, RAC, RS, RCS e RN, os modelos apresentaram comportamento semelhante. Para a RN, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 projetam redução do fator R, respectivamente, de 83%, 48% e 23%. Para as regiões RAN e RAS, os modelos projetaram aumento do fator R, com maior impacto pelo modelo Eta-MIROC5 para RAS (194%), enquanto que para a RAC, o modelo Eta-CaNESM2 simulou aumento de 378%. Para as regiões RS e RCS, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento de 120%, enquanto que o modelo Eta-MIROC5 também simulou aumento do fator R, porém, de 29%.

A distribuição espacial do fator R para o tempo presente de 2071-2099 (Figura 37), simulado por mapas, projeta alterações importantes na distribuição deste na AS.

É possível notar que as mudanças mais acentuadas são projetadas pelo modelo Eta-CaNESM2 (Figura 37a), com redução acentuada do fator R nas regiões RN e RNE, assim como da Amazônia para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil. Estas regiões são afetadas pela ZCAS, levando chuvas como elevado potencial erosivo, o que indica que as mudanças climáticas podem atuar reduzindo a configuração da ZCAS na AS no futuro, especialmente para latitudes mais altas (SE do Brasil). Para a RNE há aumento importante da área com valores inferiores a $1000 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, indicando possível diminuição da precipitação sobre o semiárido do NE brasileiro.

Considerando os demais modelos, a variação é menos intensa, como observado na simulação com o modelo Eta-HadGEM2-ES (Figura 37b), que projeta leve aumento do fator R para a RS. Para a RN e RNE, as projeções se mantem semelhantes ao período anterior, com diminuição do fator R na RNE e extremo Norte da AS, com valores máximos em torno de $1300 \text{ MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Finalmente, as projeções com o modelo Eta-MIROC5 apresentaram menor variação em relação ao período anterior no tocante à distribuição do fator R, porém, para a RN apresenta redução dos valores mais elevados especialmente na região de atuação da ZCIT.

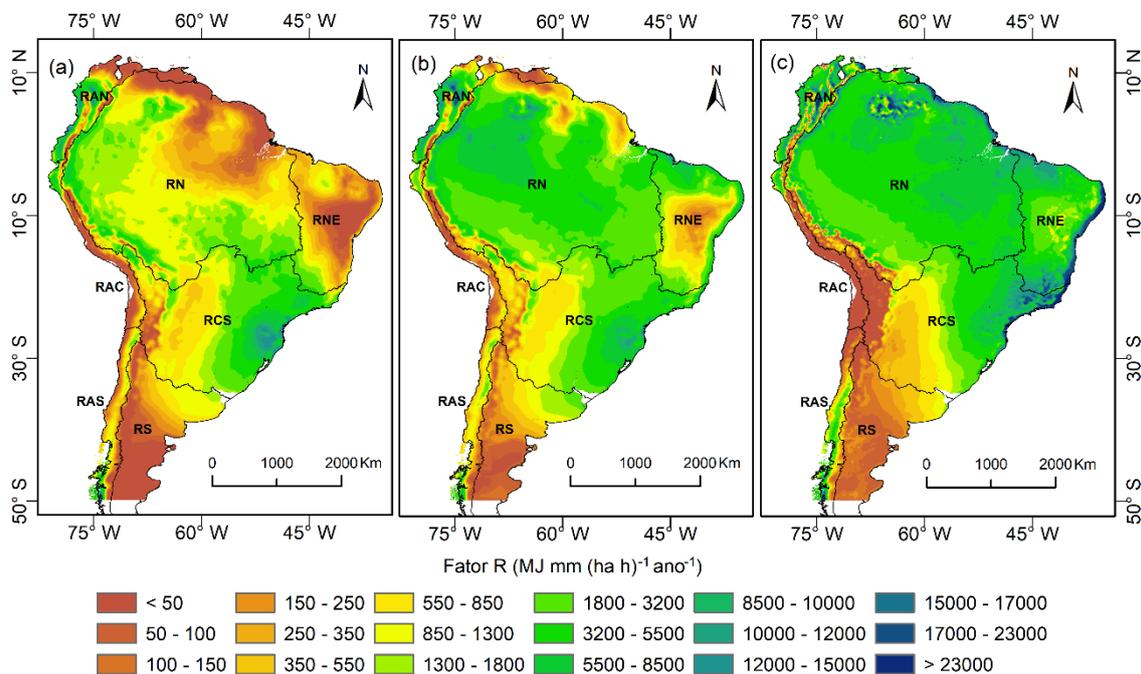


Figura 37: Mapa do fator R médio anual para a AS para o período de tempo 2071-2099, RCP 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5)

Como descrito em períodos anteriores, é possível analisar os efeitos das mudanças climáticas sobre o fator R considerando a variação consecutiva ao longo do tempo. Assim sendo, o comportamento geral da variação no fator R para o século

XXI e cenário RCP8.5 (Figura 38), observa-se um padrão semelhante nas projeções para o período de tempo 2010-2040 e 2071-2099, com variações mais acentuadas simuladas pelos modelos Eta-CaNESM2, seguido pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.

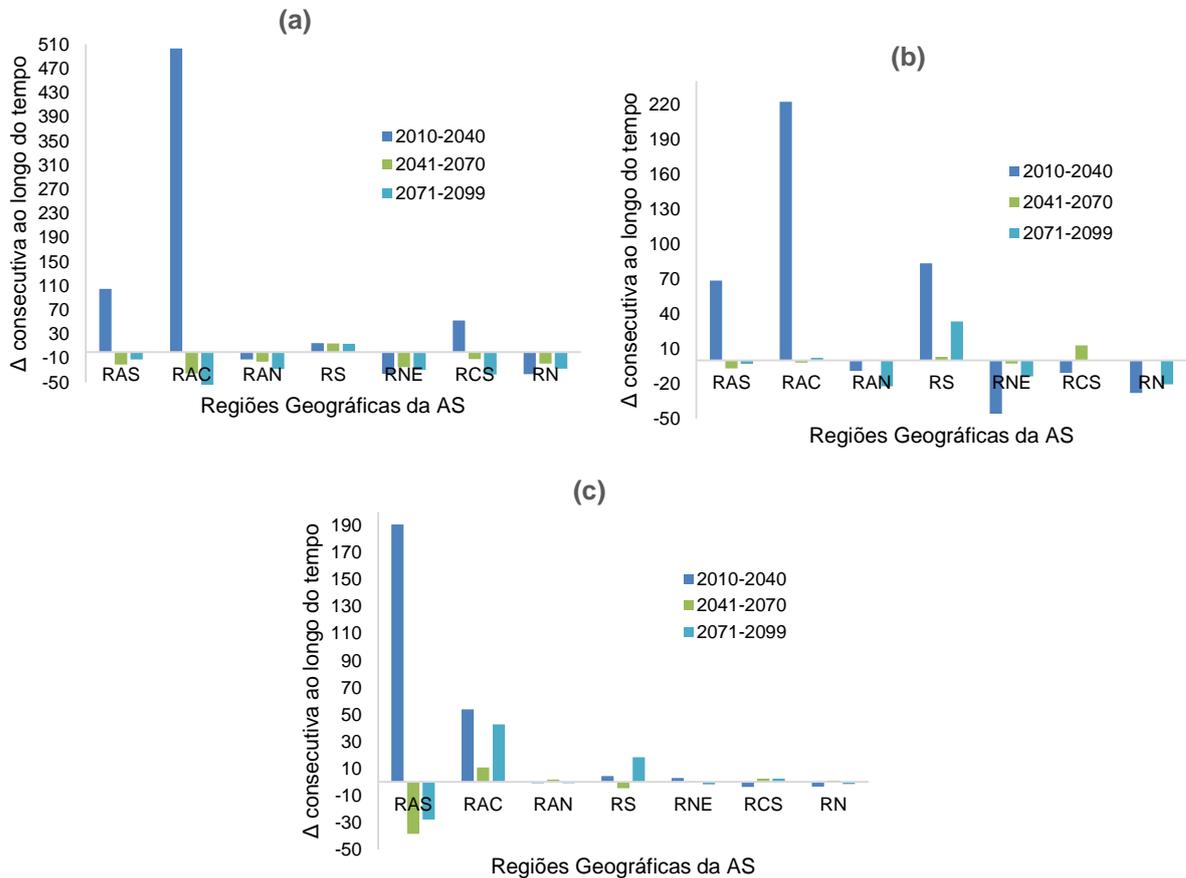


Figura 38: Variação consecutiva do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do tempo (%) para o RCP 8.5 (a. Eta-CaNESM2; b. Eta-HadGEM2-ES; c. Eta-MIROC5).

Os modelos projetam variações expressivas para as regiões RNE, RN, RAS e RAN, com redução do fator R com base nos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES. No entanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento do fator R para as regiões RAS e RNE no período 2010-2040 (Figura 32b).

Para a RN, observa-se variação significativa para o período de tempo 2010-2040, com diminuição simulada pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, respectivamente, de 36%, 28%, 18%. No entanto, para o período de tempo 2071-2099, as projeções podem alcançar uma redução em relação ao período 2041-2070 de 28%, 20% e 9%, respectivamente, sendo reflexo direto da diminuição dos totais pluviométricos simulados para a precipitação como efeito das mudanças climáticas sobre a região equatorial da AS. Outra redução acentuada foi projetada

pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES para a RNE no período 2010-2040, com reduções de até 36% e 46%, respectivamente, entretanto, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento de 35% no fator R. Da mesma forma, os modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 simulam redução significativa na ordem de 30%, 13% e 17% para a RNE no período 2071-2099 em relação ao período 2041-2070.

Para a RAS, os modelos apresentaram comportamento semelhante do fator R ao longo do século XXI, destacando-se aumento mais expressivo no período de tempo 2010-2040 para o modelo Eta-MIROC5 de 284%, seguido de 105% e 69% projetados pelos modelos Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES, respectivamente. Para a RAN, os modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES projetaram diminuição para o primeiro e o último períodos, acentuando-se a redução para o período de tempo 2071-2099 de 28% e 23%, respectivamente. Porém, o modelo Eta-MIROC5 simulou aumento para os dois primeiros períodos e redução para o período de tempo 2071-2099, com variações inferiores a 10%.

Para a RS as variações projetadas entre os períodos de tempo tendem a compensar-se ao longo do século XXI, com ressalva para a projeção do modelo Eta-HadGEM2-ES, o qual promove aumento e redução para os primeiros dois períodos de aproximadamente 80%. No entanto, para a RAC, os modelos projetaram aumento do fator R, com maior impacto para o primeiro período atingindo 503%, simulado pelo modelo Eta-CaNESM2. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, por sua vez, simulam variações menores, de 222% e 122%, respectivamente.

Em relação a RCS, os modelos apresentaram projeções discrepantes do fator R entre períodos de tempo. Dentre estas, a variação mais significativa projetada pelos modelos Eta-CaNESM2 e Eta-HadGEM2-ES foram de aumento de 52% e redução de 11%, respectivamente, para o período de tempo 2010-2040. Contudo, o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento para os três períodos, sendo o mais importante para o período 2041-2070 (14%). Discrepâncias entre os modelos são importantes de se destacar uma vez que refletem na incerteza dos resultados e no próprio comportamento dos modelos:

a) O modelo Eta-MIROC5 destaca-se como o único que simulou aumento do fator R para a RNE no primeiro período (2010-2040), no entanto, os demais modelos simularam redução do fator R, seguido de um pequeno aumento e redução, respectivamente, para o primeiro, segundo e terceiro períodos. Não obstante, o

modelo Eta-CaNESM2 simulou diminuição para todos os períodos enquanto o modelo Eta-HadGEM-ES, projetou redução para o primeiro e terceiro períodos e aumento pouco expressivo para o período 2041-2070.

b) O modelo Eta-CaNESM2 projetou redução para a RAN para os três períodos, no entanto, o modelo Eta-MIROC5 simulou aumento para os dois primeiros, e redução apenas para o período 2071-2099; o modelo Eta-HadGEM-ES projetou diminuição, ligeiro aumento e redução do fator R, consecutivamente, para o primeiro, segundo e terceiro períodos de tempo.

c) Para a RCS, o modelo Eta-CaNESM2 simulou aumento para o período de tempo 2010-2040 e redução para os demais períodos; no entanto, o modelo Eta-MIROC5 simulou aumento para os três períodos; e o modelo Eta-HadGEM-ES projetou redução, seguido de aumento do fator R para os últimos dois períodos.

Assim como projetado para o cenário RCP4.5, as regiões RAN e RCS no RCP 8.5, destacam-se por apresentar as maiores diferenças simuladas quanto as projeções realizadas pelos modelos para o século XXI, mostrando as incertezas quanto ao comportamento do fator R na AS.

Para melhor compreensão das variações para AS, a tabela 4 apresenta as mudanças dos valores médios em relação ao tempo presente, expressas em porcentagem. Assim, algumas discrepâncias entre os modelos nas projeções para precipitação assim como para o fator R são importantes de se destacar:

i) Para RAC, a maior variação foi projetada pelo modelo Eta-CaNESM2 no período 2010-2040 e cenário RCP8.5, com aumento máximo de 191% para a precipitação e 503% para o fator R, de forma semelhante ao cenário RCP4.5. A projeção de aumento mais importante da precipitação para a RAC, foi para o período 2010-2040, de 122% para a precipitação e 152% para o fator R, simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. Para ambos os cenários, este modelo projeta aumento do fator R para a RAC.

ii) Para a RAS também verificou-se aumento do fator R em ambos os cenários, simulado pelo modelo Eta-MIROC5, com alterações importantes no período 2010-2040, cenário RCP8.5, de 117% para precipitação e 285% para o fator R, de forma muito similar ao que foi projetado com base no cenário RCP4.5 por este modelo (114% e 273%, respectivamente).

iii) Para a RNE, observou-se (Tabela 4) diminuição acentuada no período 2010-2040 (RCP8.5), com redução da precipitação e do fator R, respectivamente, de 39%

e 46%. Para o cenário RCP4.5, verificou-se redução da precipitação e do fator R, para esse mesmo período de tempo, de 33% e 38%, respectivamente, ambas as projeções com base no modelo Eta-HadGEM2-ES. Da mesma forma, para a RN projetou-se redução máxima de 19% e 36%, respectivamente, para a precipitação média anual e o fator R, simulados para o período 2010-2040, e cenário RCP8.5. Com base no cenário RCP4.5 para o mesmo período de tempo, o modelo Eta-CaNESM2 simulou diminuição de 17% e 34%, respectivamente para precipitação média anual e fator R.

iv) Para a RAN, o modelo Eta-CaNESM2 simulou redução da precipitação para o período 2010-2040 (RCP4.5), de 38% e para o fator R, 9%. Esta variação se mostrou superior àquela realizada com base no cenário RCP8.5, que, para o mesmo período de tempo, apontou redução máxima de 9% e 12%, respectivamente. Cabe ressaltar que o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento tanto para a RNE e quanto a RAN, divergindo, portanto, dos outros modelos.

v) Para as regiões RS e RCS, as projeções dos modelos divergem quanto às variações para o período 2010-2040 para ambos cenários. O modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento para a RS para 2010-2040, de 57% e 83%, respectivamente, para a precipitação e o fator R no cenário RCP8.5. Considerando o RCP4.5, foram projetados aumentos de 41% e 73%. As projeções dos demais modelos mostraram variações menos expressivas para a RS. Em relação à RCS, também foram observadas divergências pelos modelos, com aumento expressivo para precipitação e fator R, em ambos cenários projetados pelo modelo Eta-CaNESM2, com aumento máximo de 27% e 55%, respectivamente. No entanto, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou diminuição máxima de 4% e 13% para precipitação e fator R, respectivamente, ou seja, impactos consideravelmente inferiores. Ao se analisar os resultados projetados pelo modelo Eta-MIROC5, observou-se diminuição para a precipitação e aumento para o fator R, respectivamente, de 10% e 12%.

Quanto às projeções para o período de tempo 2041-2070, estas sugerem similaridade com o período anterior para as regiões da AS no tocante ao comportamento da precipitação e do fator R, para ambos cenários. Resumidamente, as regiões RAS, RAC, RS e RCS apresentaram elevação significativa, enquanto que para as regiões RN, RNE e RAN, observou-se diminuição da precipitação e do fator R. A seguir serão apresentadas mais detalhadamente as variações projetadas em relação ao tempo presente (Tabela 4).

Tabela 4: Variação da Precipitação e fator R (%) representando os valores médios nas Regiões Geográficas da AS para os modelos globais (RCP 4.5 e 8.5) para o século XXI.

Cenário	Período	Modelo	Variação da Precipitação e fator R (%) nas Regiões Geográficas da AS													
			RAS		RAC		RAN		RS		RNE		RCS		RN	
			*P	**F.R	P	F. R	P	F. R	P	F. R	P	F. R	P	F. R	P	F. R
RCP4.5	2010-2040	CaNESM2	-26	109	-34	521	-38	-9	-4	5	-25	-33	27	55	-17	-34
		HadGEM2-ES	49	113	122	152	-11	-16	41	73	-33	-38	-4	-13	-16	-30
		MIROC5	114	273	32	104	0	9	5	-15	26	48	-8	12	-10	-14
	2041-2070	CaNESM2	27	93	199	543	-11	-15	3	17	-34	-45	26	49	-22	-41
		HadGEM2-ES	37	92	147	204	-9	-14	38	67	-23	-27	8	7	-13	-26
		MIROC5	97	237	45	140	3	15	5	-12	27	48	-1	25	-8	-11
	2071-2099	CaNESM2	25	90	214	581	-12	-16	5	24	-40	-53	26	49	-27	-47
		HadGEM2-ES	37	92	143	197	-13	-19	48	87	-31	-38	11	10	-15	-30
		MIROC5	96	240	37	123	-1	9	1	-17	24	46	-6	14	-11	-16
RCP8.5	2010-2040	CaNESM2	32	105	191	503	-9	-12	2	15	-27	-36	26	52	-19	-36
		HadGEM2-ES	29	69	154	222	-5	-9	57	83	-39	-46	-3	-11	-14	-28
		MIROC5	117	284	38	122	-3	5	3	-18	18	35	-10	6	-13	-18
	2041-2070	CaNESM2	23	85	187	468	-21	-28	9	30	-47	-61	23	41	-34	-55
		HadGEM2-ES	24	62	146	220	-5	-8	55	86	-40	-49	6	2	-13	-28
		MIROC5	94	236	46	144	2	13	0.2	-18	19	35	-3	20	-9	-14
	2071-2099	CaNESM2	19	72	184	378	-45	-56	20	43	-80	-91	6	4	-64	-83
		HadGEM2-ES	23	59	156	222	-23	-31	73	120	-52	-62	9	2	-29	-48
		MIROC5	76	194	76	232	-0.4	9.5	12	2	8	18	3	29	-15	-23

*Precipitação; **fator R

Para a RAC, a maior variação foi projetada pelo modelo Eta-CaNESM2 no período 2041-2070 (RCP4.5), com aumento máximo de 199% para a precipitação e 543% para o fator R, com comportamento semelhante para o RCP8.5. A projeção mais significativa da precipitação para a RAC, no período 2010-2040, foi da ordem de 187% para a precipitação e 468% para o fator R, também projetado pelo modelo Eta-CaNESM2.

A RAS também apresentou elevação da precipitação (97%) e do fator R (237%) em ambos cenários projetados pelo modelo Eta-MIROC5, com alterações expressivas no período 2041-2070 (RCP4.5). Não menos importante, no RCP8.5 igualmente foram projetados aumentos de 94% e 236%.

Não obstante, há diminuição acentuada para a RNE, no período 2041-2070 (RCP8.5), com diminuição da precipitação em 47% e de 61% para o fator R. Para o RCP4.5, verificou-se redução na precipitação e fator R, respectivamente, de 33% e 38%, ambas projeções pelo modelo Eta-CaNESM2. Da mesma forma, para a RN, projetou-se redução máxima de 34% e 55% para precipitação e fator R, respectivamente, no período 2041-2070 (RCP8.5), e para o RCP4.5, para o mesmo período, o modelo Eta-CaNESM2 projetou diminuição de 22% e 41%.

Para a RAN o modelo Eta-CaNESM2 projetou redução da precipitação para o período 2041-2070 e cenário RCP8.5 na ordem de 21% e 28% para precipitação e fator R, respectivamente. Esta variação é superior ao projetado com base no RCP4.5 para o mesmo período, com redução máxima de 11% e 15%, respectivamente. Cabe ressaltar que o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento para a RNE e RAN, divergindo dos demais modelos que projetaram redução tanto da precipitação quanto do fator R.

Para as regiões RS e RCS as projeções dos modelos divergem para o período 2041-2070 para ambos RCPs, no entanto, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento na RS de 55% e 36%, respectivamente, para precipitação e fator R e no cenário RCP8.5. Aumentos, respectivamente, de 38% e 67% para o cenário RCP4.5 foram também projetados. Com os demais modelos as variações são menos importantes para RS.

Em relação a RCS, as simulações apresentaram elevação significativa da precipitação e do fator R em ambos cenários projetados pelo modelo Eta-CaNESM2, sendo respectivamente, de 26% e 49% para o cenário RCP4.5. Para o cenário RCP8.5 os aumentos foram, respectivamente, de 23% e 41%. No que concerne às projeções

com o modelo Eta-MIROC5, verificou-se diminuição para a precipitação na ordem de 3% e aumento de 25% para o fator R.

Por fim, as projeções para o período 2071-2099 indicam semelhanças com o período anterior para ambos cenários (Tabela 4). Sendo assim, a RAS, RAC, RS e RCS apresentaram aumento expressivo, enquanto que para as regiões RN, RNE e RAN apresentaram diminuição da precipitação e do fator R. Na sequência, são apresentados maiores detalhes em relação aos cenários.

Para a RAC, a maior alteração foi projetada pelo modelo Eta-CaNESM2 no período 2071-2099 (RCP4.5), com elevação máxima de 214% para a precipitação e 581% para o fator R. Para o cenário RCP8.5, observou-se a projeção mais significativa da precipitação para esta região da AS, especialmente no período 2071-2099, sendo de 184% para a precipitação e 378% para o fator R, com base no modelo Eta-CaNESM2.

A RAS igualmente apresenta elevação da precipitação e fator R em ambos cenários, projetados pelo modelo Eta-MIROC5, com maiores alterações no período 2071-2099 (RCP4.5), sendo de 96% para precipitação e 240% para o fator R. Com base no cenário RCP8.5, projetou-se elevação de 76% e 194% para a precipitação e fator R, respectivamente.

Contudo, há projeção de redução acentuada para a RN período 2071-2099 (RCP8.5), com redução da precipitação de 64% e 83% para o fator R. Comportamento semelhante também foi observado para o RCP4.5, com diminuição de 27% e 47%, respectivamente para precipitação e fator R, com o modelo Eta-CaNESM2. Da mesma forma, para a RNE projetou-se redução máxima de 80% e 91%, respectivamente, para a precipitação e fator R, projetado para o período 2071-2099 (RCP8.5). Para o cenário RCP4.5 no mesmo período usando o modelo Eta-CaNESM2, projetou redução de 40% e 53% para a precipitação e fator R. Do mesmo modo, para a RAN, o modelo Eta-CaNESM2 projetou redução da precipitação para o período 2071-2099 (RCP8.5) de 45% e 56%, respectivamente, para precipitação e fator R. Esta variação se mostra superior ao RCP4.5 para o mesmo período, com redução máxima de 12% e 16%. Cabe destacar que o modelo Eta-MIROC5 projetou aumento para as regiões RNE e RAN, divergindo dos demais modelos que projetam redução tanto para precipitação quanto para o fator R.

Para as revisões RS e RCS as projeções dos modelos divergem quanto as variações na precipitação média anual e fator R para o período 2071-2099, em ambos

cenários, no entanto, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou aumento na RS para o período 2071-2099 de 73% e 120%, respectivamente para precipitação média anual e fator R no cenário RCP8.5. Ainda, aumento de 48% e 87% para a precipitação e fator R, respectivamente, para o cenário RCP4.5 também foram observados, verificando-se que as projeções vinculadas ao cenário RCP8.5 poderão ser consideravelmente maiores do que para o cenário 4.5. Para os demais modelos as variações são menos expressivas para a RS. Cabe mencionar ainda que o modelo Eta-MIROC5 projetou redução do fator R de 17%.

Com relação a RCS, as simulações apresentam elevação significativa para precipitação e fator R, em ambos os cenários projetados pelo modelo Eta-CaNESM2, com elevação máxima de 26% e 49% para o RCP4.5, respectivamente. Para o cenário RCP8.5, projetou-se aumento da precipitação e fator R na ordem de 9% e 29% com os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. No que se refere ao modelo Eta-MIROC5, verificou-se diminuição da precipitação em 6% e de elevação de 14% para o fator R.

É possível observar que há pouca similaridade nas variações, cenários, e modelos, denotando incertezas relevantes sobre o comportamento futuro do fator R. No entanto, observa-se tendências entre as projeções na variabilidade da precipitação e fator R nas regiões geográficas da AS da seguinte forma:

- a) Aumento da precipitação e fator R para as regiões RAS, RAC, RS e RCS; por outro lado, para as regiões RN, RNE e RAN verificou-se redução considerável da precipitação e do fator R.
- b) Nas regiões RAS e RAC as projeções indicaram elevações mais expressivas tanto para a precipitação quanto para o fator R.
- c) As regiões RS e RCS são as que apresentaram menor variabilidade em relação ao tempo presente. No entanto, apresentaram maior incerteza em decorrência dos diferentes resultados proporcionados pelos modelos, especialmente o Eta-MIROC5.
- d) Para as regiões RN, RNE e RAN as projeções indicaram redução importante da precipitação e do fator R, acentuando-se principalmente no período 2071-2099 e cenário RCP8.5.
- e) Quanto à magnitude das variações, o modelo Eta-CaNESM2 se destaca pelas projeções mais importantes; o modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta variações intermediárias; e o modelo Eta-MIROC5 as menores alterações, salvo situações específicas como exposto na tabela 4.

5 Considerações Finais

1. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um mapa para estimativa do fator R na América do Sul através de um modelo geográfico (fator $R = f [P, LA, LO, A]$). O modelo geográfico apresentou boas qualidades estatísticas com coeficiente de determinação ajustado superior a 0,60, e variáveis significativas pelo teste t de Student e método stepwise. Um banco de dados foi gerado com base em dados compilados representando os diferentes gradientes topográficos e climatológicos da América do Sul com a finalidade de ajustar o modelo para o fator R. O modelo apresenta boa capacidade preditiva mostrando-se adequado para estimar o fator R na AS.

2. Para análise do desempenho global do fator R e melhor compreensão da estimativa do fator R foram gerados mapas com base no modelo, subdividido em 18 classes, com resolução espacial de 90 metros. Assim, o mapa apresentou grande variabilidade, especialmente para as regiões RAS, RAN, RNE. O gradiente espacial do fator R desloca-se no sentido sudoeste-nordeste, com valores que podem variar desde ligeiramente abaixo de 50 e 23000 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, com baixo potencial erosivo na RAC e RS e elevado na RN na ordem, respectivamente, de 139, 230 e 6761 MJ mm (ha h)⁻¹ ano⁻¹, acompanhando a distribuição espacial da precipitação na América do Sul.

3. Foi possível as projeções do fator R ao longo do século XXI pelos MCG Eta-CaNESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para AS, pelas boas qualidades estatísticas apresentadas, com coeficiente de correlação superior a 0,90 entre os mapas para o tempo presente (modelos) e com base nos dados observados. Com base nas simulações para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 pode-se concluir para o fator R ao longo do século XXI: aumentos expressivos do fator R para a RAC e RAS para ambos RCPs; redução do fator R para a RN com mais relevância no período 2071-2099; para as regiões RAN e RNE tendência maior de redução a partir de mediados do século XXI; e maior tendência de aumento do fator R para a RS e RCS.

4. Para mudança climática foi possível por meio da krigagem ordinária, a obtenção de mapas de precipitação média anual com boa capacidade preditiva para capturar o

padrão da precipitação no continente. Assim, os modelos apresentaram um coeficiente de correlação superior a 0,70. Com destaque para o modelo Eta-HadGEM2-ES que apresentou o maior coeficiente de correlação ($r = 0,97$) em relação ao mapa presente.

5. Os valores elevados de precipitação são observados nas regiões tropical e equatorial, ressaltando RN, RAN e RAS. As diferentes condições climáticas da AS e sua complexidade topográfica condicionam a alta variabilidade dos totais precipitados, gerando padrões com distintas características regionais, que vão desde regiões desérticas até a RN com floresta equatorial.

6. Com base nas simulações da precipitação média anual ao longo do século XXI pelos modelos climáticos para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 pode-se concluir tendência maior de aumentos expressivos na RAC e aumentos para a RAS e RS para ambos cenários; redução da precipitação para as regiões RN e RNE; e incertezas quanto ao comportamento da precipitação nas regiões RAN e RCS. Para as mudanças da precipitação média anual foi possível concluir que estas afetam diretamente o comportamento do fator R na AS.

7. Recomenda-se para trabalhos futuros, desenvolver e aplicar a RUSLE2 para todo o continente, usando os resultados deste estudo sobre o fator R, visando a geração de mapas de perda de solos.

Referências

- ANGULO-MARTINEZ, M. M; LÓPEZ-VICENTE, S. M; VICENTE-SERRANO; S. BEGUERIA. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro Basin (NE Spain). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 1907-1920, 2009.
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (níveis OTTO). Divisão Hidrográfica. Portal de Metadados Geoespaciais da ANA. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acesso em: 05 de mai. 2018.
- ALEXANDER, L. V. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 1-22, 2006.
- ALBUQUERQUE, J. **Erosividade das chuvas na bacia hidrográfica do Rio Apeú, região nordeste do estado do Pará**. 2013. 70f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu/SP. 2013.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIN, R. S. S.; COUTO, E. G.; ELTZ, F. L. F.; BORGES, L. E. C. Erosive potential of rainfall in Cuiabá, MT: distribution and correlation with rainfall. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p. 178-184, 2011.
- ALMEIDA, C. O. S; AMORIM, R. S. S; ELTZ, F.L. F; COUTO, E. G; JORDANI, S. A. Erosividade da chuva em municípios do Mato Grosso: Distribuição sazonal e correlações com dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.142-152, 2012
- ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, v. 379, p.111-121, 2009.
- ARANEDA, A.; CISTERNAS, M.; URRUTIA, R. USLE y análisis isotópicos en la reconstrucción de la historia erosional en una cuenca lacustre. **Bosque**. Concepción, Chile, v. 20, n. 2, p. 95-105, 1999.

AQUINO, R. F; SILVA, M. L. N; FREITAS, D.A.F; CURI, N; MELLO, C. R; AVANZI, J. C. Spatial variability of the rainfall erosivity in Southern region of Minas Gerais State, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36 p. 533-542, 2012.

BACK, Á. J.; POLETO, C. Avaliação temporal do potencial erosivo das chuvas de Florianópolis-SC. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 21, p.264-283, 2017.

BAKER, P. A. et al. The History of South American Tropical Precipitation for the Past 25.000 Years. **Science**, v. 291, p. 640-643, 2007.

BAZZANO, M. G. P; ELTZ, F. L. F; CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.1205-1217, 2007.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosivity and hydrological characteristics of rainfalls in Rio Grande (RS, Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 235-244, 2010.

BERTOL, I. Evaluation for rain erosivity for Campos Novos (SC) during the 1981-1990 period. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p.1453-1458, 1994.

BERTOL, I.; LEITE, D.; ENGEL, F.L.; COGO, N.P.; GONZÁLEZ, A.P. Erodibilidade de um nitossolo háplico alumínico determinada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 31, n. 3, p. 541-549, 2007.

BERTOL, I.; ZOLDAN JUNIOR, W.A.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; PEGORARO, R.; GONZÁLES, A.P. Efeito de escarificação e da erosividade de chuvas sobre algumas variáveis de valores de erosão hídrica em sistemas de manejo de um nitossolo háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, n. 2, p. 747-757, 2008.

BERRY, G.; INZUNZA J.B. The effect of the low-level jet during the warm season of 1993. **Monthly Weather Review**, v. 9, p. 2176-2192, 1993.

BESKOW, S., MELLO, C.R., NORTON, D.L., CURI, N., VIOLA, M.R., AVANZI, J.C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49-59, 2009.

BONILLA, C.; VIDAL, K. Rainfall erosivity in Central Chile. **Journal of Hydrology**, v. 410, p. 126-133, 2011.

BORK, Hans R.; LANG, Andreas. Quantification of past soil erosion and land use/land cover changes in Germany, in: long term hillslope and fluvial system modelling, concepts and case studies 20 from the Rhine river catchment. **Lecture Notes in Earth Sciences**. Berlin: Springer, p. 231-239, 2003.

BRAZIL. Ministry of Science, Technology and Innovation. Secretariat of Policies and Programs of Research and Development. General Coordination of Global Climate Change. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary/ Ministry of Science, Technology and Innovation. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 42 p.

BROWN, L.C.; FOSTER, G.R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 30, n. 2, p. 379-386, 1987.

CABRAL, J. B. P.; BECEGATO, V.A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M. Uso de técnicas de geoprocessamento para mapear o potencial natural de erosão da chuva na bacia hidrográfica do reservatório de Cachoeira Dourada – GO/MG. **R. RA'E GA**, v. 10, p. 107-116, 2005.

CANTALICE, J. R. B; BEZERRA, S. A; FIGUEIRA, S. B; INÁCIO, E. S. B; SILVA, M. D. R. O. Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco – 1ª aproximação. **Caatinga**, v.22, p. 75-80, 2009.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C.A.; FRANCO, E. M.; VALCARCEL, R.; BERTOL, I. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 9, p. 7-14, 2005.

CAPOLONGO, D.; DIODATO, N.; MANNAERTS, C.M.; PICCARRETA, M.; STROBL, R.O. Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 356, p.119-130, 2008.

CASSOL, E. A; MARTINS, D; ELTZ, F. L. F; LIMA, V. S; BUENO, A. C. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p. 220-231, 2007.

COLODRO, G.; CARVALHO, M. P.; ROQUE, C. G.; PRADO, R. M. Erosividade da chuva: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodoro Sampaio (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p.809-818, 2002.

COLLINS, W.J., et al. Development and Evaluation of an Earth-System Model- HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051-1075, 2011.

CHOU, S.C; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014a.

CHOU, S. C; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014b.

CHYLEK, P.; LI, J.; DUBEY, M. K.; WANG, M.; LESINS, G. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 11, p. 22893–22907, 2011.

CÓRDOVA ELERA, Y. **Estimación de la tasa de erosión hídrica en la microcuenca de la Quebrada Chaye Grande de la subcuenca del río Yapatera**. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía; Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Piura. Perú, 2015, p. 107.

CORREA, SLY W.; MELLO, CARLOS R.; CHOU, SIN C.; CURI, Nilton; NORTON, LLOYD D. Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. **Catena**, v. 147, p. 110-124, 2016.

DAVISON, P.; HUTCHINS, M.G.; ANTHONY, S.G.; BETSON, M.; JOHNSON, M.; LORD, E.I. The relationship between potentially erosive storm energy and daily rainfall quantity in England and Wales. **The Science of the Total Environment**, v. 344, p. 15-25, 2005.

DOETTERL, Sebastian; VAN OOST, Kristof; SIX, Johan. **Towards constraining the magnitude of global agricultural sediment and soil organic carbon fluxes**, Earth Surface Processes and Landforms. Wiley, v. 37, 2012, p. 642-655.

DIODATO, N.; BELLOCCHI, G. MedREM, a rainfall erosivity model for the Mediterranean region. **Journal of Hydrology**, v. 387, p. 119-127, 2010a.

DIODATO, N., BELLOCCHI, G. Storminess and environmental changes in the Mediterranean Central Area. Earth Interactions. **American Meteorological Society**, v. 14, p. 1-16, 2010b.

ECHEVERRI, L.; OBANDO, F. H. Erosividad de las Lluvias en la Región Centro-Sur del Departamento de Caldas, Colombia. **Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín**, Colombia, v. 63, n. 1, p. 5307-5318, 2010.

ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; PASCOTINI, P. B. Erosivity potential and characteristics of rainfalls at Encruzilhada do Sul, RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p. 331-337, 2011.

ESCOBAR, G. C.; SELUCHI, M. E.; ANDRADE, A. Classificação Sinótica de Frentes Frias Asociadas a Chuvas Extremas no Leste de Santa Catarina (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4(suppl.), p. 649-661, 2016.

ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; JUNQUAS, C.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W.; POMBOSA, R. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 13, 5 p., 2011.

FERREIRA, J. N; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M. Composição da Zona de Convergência do Atlântico sul em períodos de el Niño e la Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p. 89-98, 2004.

GARSTANG, M., H. L. et al. **Amazon coastal squall lines. Part I: Structure and kinematics**. Monthly Weather. Review. **American Meteorological Society**, v. 122, p. 608-622, 1994.

GAITÁN, J; NAVARRO, M; VUEGEN, L; PIZARRO, M; CARFAGNO, P; RIGO, S. **Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina**. Instituto de Suelos-Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRN) Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias -INTA. Buenos Aires: Ediciones INTA, 1ª. ed., 2017, 72 p.

GARCÍA, M. J; TRELLES, L. G. **Evaluación de la tasa de erosión con el método USLE en la cuenca del río mizque provincia mizque departamento Cochabamba- Bolivia**. 1er Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología Querétaro, México, p. 8, 2015.

GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, 269-276, 2006.

GUIO MARTÍNEZ, V. H.; CELY REYES, G.; MORENO-PÉREZ, D. F. Determinación y mapificación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del embalse de La Copa, Boyacá, Colombia. **Ingenio Magno**, v. 6, p. 34-46, 2015.

HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 1965-1978, 2005.

HOYOS, N.; WAYLEN, P.R.; JARAMILLO, A. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 314, p.177-191, 2005.

IPCC Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L., Eds, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2007, p. 996.

IPCC Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, p. 1535.

LEE, J.H.; HEO, J.H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. **Journal of Hydrology**, v. 409, p. 30-48, 2011.

LIEPERT, B.G.; PREVIDI, M. Do models and observations disagree on the rainfall response to global warming?. **Journal of Climate**, v. 22, p. 3156-3166, 2009.

LOBO LUJAN, D.; GABRIELS, D. Assessing the rain erosivity and rain distribution in different agro-climatological zones in Venezuela. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, Special Issue, p. 16-29, 2005.

LYRA, A., TAVARES, P., CHOU, S.C., SUEIRO, G., DERECHYNSKI, C.P., SONDERMANN, M., SILVA, A., MARENGO, J., GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theor Appl Climatol**, v. 132, p. 19, 2017.

MARENGO, A. J; NOBRE, A. C. Clima da Região Amazônica. In: **Tempo e Clima no Brasil**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, Cap. 2, p. 197-207.

MARENGO, A. J. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Journal Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2011.

MARENGO, J. A. et al. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade (DCBio). Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade-Subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, 2007.

MARENGO, J. A.; M. W. DOUGLAS; P. L. SILVA DIAS. The South American low level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TMM and LBA-WET AMC campaign. **J. Geophys. Res.**, v.107, 2002.

MARQUES, J.J.G.S.M; ALVARENGA, R. C; CURI, N. Erosividade das chuvas da região de Sete Lagoas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 285-288, 1998.

MARTIN, G.M., et al. (2011) The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 723-757, 2011.

MARTINS, S. G; AVANZI, J. C; SILVA, M. L. N; CURI, N; NORTON, L. D; FONSECA, S. Rainfall erosivity and rainfall return period in the Experimental Watershed of Aracruz, in the Coastal Plain of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 999-1004, 2010.

MELLO, C. R; SÁ, M. A. C; CURI, N; MELLO, J. M; VIOLA, M.R. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 537-545, 2007.

MELLO, C. R; NORTON, L. D; CURI, N; YANAGI, S. N. M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 53-59, 2012.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; OWENS, P. R.; MELLO, J. M., BESKOW, S. Interpolation methods for improving the RUSLE R-factor mapping in Brazil. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 70, p.182-197, 2015.

MORETI, D.; CARVALHO, M. P.; MANNIGEL, A. R.; MEDEIROS, L. R. Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Miguel (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.713-725, 2003.

NAIPAL, V.; REICK, C.; PONGRATZ, J.; VAN OOST, K. Improving the global applicability of the RUSLE model - adjustment of the topographical and rainfall erosivity factors. **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 2991-3035, 2015.

NACHTERGAELE, F.; BIANCALANI, R.; PETRI, M. Land degradation. SOLAW Background Thematic Report 3. 2009, 14p. Disponível em: www.fao.org/.../SOLAW_thematic_report_3_land_degradation.pdf. Acesso em: 04 abr. 2018.

NEARING, M. A.; YIN, S.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: an historical review. **Catena**, v.157, p. 357-362, 2017

NEW, M.; LOPEZ, A.; DESSAI, S.; WILBY, R. Challenges in using probabilistic climate change information for impact assessments: an example from the water sector. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, p. 2117-2131, 2007.

OCHOA, P.; FRIES, A.; MEJÍA, D.; BURNEO, J.; RUÍZ-SINOGA, J.; CERDÀ, A. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes. **Catena**, v.140, p. 31-42, 2016.

OLIVEIRA JR, R. C; MEDINA, B. F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 14, p. 235-239, 1990.

OLIVEIRA JR., R. C.; LOPES, O. M. N.; MELO, A. S. A erosividade das chuvas em Cametá, Tucuruí e Paragominas, no Estado do Pará. **Boletim da FCAP**, Belém, v. 18, p. 2-26, 1989.

OLIVEIRA JR.; R. C.; RODRIGUES, T. E.; MELO, A. S. A erosividade das chuvas nos municípios de Bragança e Marabá no Estado do Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Série Ciências da Terra**, Belém, v. 4, p. 45-57, 1992.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES, SOBRINHO T.; CARVALHO, D. F.; PANACHUKI, E. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 69-79, 2011.

OLIVEIRA, P. T.; WENDLAND, E; NEARING, M. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2012.

OLIVEIRA, P. T.; RODRIGUES, D. B. B; SOBRINHO, T. A; CARVALHO, D. F; PANACHUKI, E.P. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 69-79, 2012.

ORLOWSKY, B.; SENEVIRATNE, S. I. Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. **Climatic Change**, v. 110, p. 669-696, 2012.

PANAGOS, P. et al. **Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records**. Scientific Reports, 2017, 12 p. Disponível em: <www.nature.com/scientificreports> Acesso em: 10 set. 2017.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PÉREZ, M.; PIAGGIO J. M.; BAETHGEN, W.; GARCÍA, P. F. Actualización del factor erosividad de la lluvia en Uruguay. **Agrociencia Uruguay**, v. 21 n. 2, p. 91-99, 2017.

PREVIDI, M.; LIEPERT, B.G. Interdecadal variability of rainfall on a warming planet. **EOS, Transactions of the American Geophysical Union**, v. 89, n. 21, p. 193-195, 2008.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Agriculture Handbook. United States Department of Agriculture, n. 703, 1997, 404 p.

RODRÍGUEZ CRISTALDO, R. Erosividad de la lluvia en el Departamento de Alto Paraná, Paraguay. Tesis de Magister. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, 2012, p. 76.

ROMATSCHKE, U.; HOUZE JR., R. Extreme Summer Convection in South America. **Journal of Climate**. American Meteorological Society, v. 23, p. 3761-3791, 2010.
ROJAS A. E.; CONDE, A. Estimación del factor «R» de la ecuación universal de pérdida de suelo para el centro-este de la República Argentina. **Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo**, v. 3, p. 85-94, 1985.

ROSA, A.; SOUSA, A. M. L.; COSTA, J. A.; SOUZA, E. B. Erosividade da chuva em Rondon do Pará, PA, Brasil de 1999 a 2015 e projetada para 2035. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 11 n. 4, p. 1007-1021, 2016.

ROQUE, C.G; CARVALHO, M.P; PRADO, R.M. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p.147-156, 2001.

RUPPENTHAL, M.; LEIHNER, D.; HILGER, T.; CASTILLO F, J. Rainfall erosivity and erodibility of inceptisols in the southwest Colombian Andes. Centro International de Agricultura Tropical (CIAT). *Expl Agric. Cambridge University Press*, v. 32, p. 91-101, 1996.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, E. L. Mesoscale convective systems over southeastern South America and their relationship with the South American low-level jet. **Mon. Wea. Rev.**, v. 135, p. 1290-1309, 2007.

SALUSO, J. H. **Actualización del Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) para una amplia zona del país período 1950/2005**. Agricultura Sustentable, Actualización Técnica, INTA EEA Paraná, p. 49-53, 2008.

SANTOS JÚNIOR, A. B. **Erosividade e padrão de chuva em Teresina e Parnaíba no Piauí**. 2011. 45f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2011.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A. P. Erosividade de chuvas em Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p.1890-1905, 2014.

SELUCHI, M.; MARENGO, J. A. Tropical-mid latitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and extreme events, **Int. J. Climatol.**, v. 20, p. 1167-1190, 2002.

SHAMSHAD, A., AZHARI, M. N., ISA, M.H., WANHUSSIN, W. M. A., PARIDA, B.P. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE E₁₃₀ index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. **Catena**, v. 72, p. 423-432, 2008.

SOLANO PERALTA, R. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Subcuenca del río Shullcas 2000 – 2013, Huancayo. Tesis de Grado. Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Nacional del Centro del Perú. Perú, 2016, p. 117.

SILVA, M. L. N; FREITAS, P. L; BLANCANEUX, P; CURI, N. Índices de erosividades das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 275-289, 1997.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, p. 251-259, 2004.
SILVA, R.B.; IORI, P.; SILVA, F. A. M. Proposition and compare of equations to estimate the rainfall erosivity in two cities of São Paulo state. **Irriga**, v.14, p. 533-547, 2009.

SILVA, R. B.; IORI, P.; ARMESTO, C.; BENDINI, H. N. Assessing rainfall erosivity with artificial neural networks for the Ribeira Valley, Brazil. **International Journal of Agronomy**, 7 p., 2010.

SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças Climáticas na Bacia do Rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.
SMITH, D. D. **Interpretation of soil conservation data for field use**. Agriculture Eng. v. 22, p. 173-175, 1941.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Uncertainty assessments of climate projections over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 112, p. 253-272, 2013.

United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). **Zero Net Land Degradation**. A Sustainable Development Goal for Rio+20. Bonn, Germany, 2012.

VALVASSORI, M. L.; BACK, Á. J. Avaliação do potencial erosivo das chuvas em Urussanga, SC, no período de 1980 a 2012. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.1011-1019, 2014.

VELIZ, J. J. **Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo U.S.L.E, mediante herramientas S.I.G, aplicado en la Subcuenca río Portoviejo, provincia de Manabí.** Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador, 2015, p. 143.

VERA, C.; C. VERA; J. BAEZ; M. DOUGLAS; C. B. EMMANUEL; J. MARENGO; J. MEITIN; M. NICOLINI; J. NOGUES-PAEGLE; J. PAEGLE; O. PENALBA; P. SALIO; C. SAULO; M. A. SILVA DIAS; P. SILVA DIAS; E. ZIPSER. The South American Low-Level Jet Experiment. **American Meteorological Society**, p. 63-77, 2006a.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 13, 4 p., 2006b.

VIOLA, M. R; AVANZI, J. C; MELLO, C. R; LIMA, S. O; ALVES, M. G. V. Distribuição e potencial erosivo das chuvas no Estado do Tocantins. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p.125-135, 2014.

WALTRICK, P. C; MACHADO M. A. DE M; DIECKOW J, DE OLIVEIRA D. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p. 256–267, 2015.

WATANABE, M., et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, v. 23, p. 6312-6335, 2010.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H. Cropping management factor evaluation for a universal soil-loss equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, p. 322-325, 1960.

WISCHMEIER, W.H. Use and misuse of the universal soil loss equation. **Journal Soil Water Conservation**, v. 31, p. 5-9, 1976.

WISCHMEIER, W.H. e SMITH, D.D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains**: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Agriculture Handbook. Washington: U S Department of Agriculture. 1965, p. 282.

WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agriculture Handbook. Washington: U S Department of Agriculture, 1978, 58 p.

YANG, D.; KANAE, S.; OKI, T.; KOIKE, T.; MUSIAKE, K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes, Hydrological Processes. **Wiley Online Library**, v. 17, p. 2913-2928, 2003.

ZIPSER, E. J.; CECIL, D. J.; LIU, C.; NESBITT, S. W.; YORTY, D. P. Where are the most intense thunderstorms on earth? Bull. **American Meteorological Society**, v. 87, p. 1057-1071, 2006.

Apêndice

Apêndice A- Tabela com registros do fator R, localidade, coordenadas geográficas, altitude, precipitação média, referência e período de estudo.

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
1	CL	El Sobrante	-32.23	-70.78	71	810	144	-	16	Bonilla e Vidal (2011)
2	CL	Lliu-Lliu	-33.10	-71.22	623	260	388	-	19	Bonilla e Vidal (2011)
3	CL	Pirque	-33.66	-70.58	206	670	338	-	18	Bonilla e Vidal (2011)
4	CL	Melipilla	-33.68	-71.20	231	170	320	-	20	Bonilla e Vidal (2011)
5	CL	Rengo	-34.42	-70.87	371	310	477	-	16	Bonilla e Vidal (2011)
6	CL	C. Las Nieves	-34.50	-70.70	763	700	779	-	20	Bonilla e Vidal (2011)
7	CL	Colorado	-35.63	-71.26	1973	420	1286	-	17	Bonilla e Vidal (2011)
8	CL	Bullileo	-36.28	-71.42	4025	600	2208	-	22	Bonilla e Vidal (2011)
9	CL	Chillán	-36.63	-72.10	875	125	967	-	11	Bonilla e Vidal (2011)
10	CL	Caracol	-36.65	-71.38	2683	620	1742	-	16	Bonilla e Vidal (2011)
11	CL	Coihueco	-36.65	-71.82	1635	300	1066	-	17	Bonilla e Vidal (2011)
12	CL	Diguillín	-36.86	-71.63	2652	670	1595	-	15	Bonilla e Vidal (2011)
13	CL	Quilaco	-37.68	-72.00	1513	225	1461	-	16	Bonilla e Vidal (2011)
14	CL	Cerro El Padre	-37.78	-71.86	2375	400	1691	-	14	Bonilla e Vidal (2011)
15	CL	El Vergel	-37.80	-72.65	683	75	790	-	20	Bonilla e Vidal (2011)
16	CL	Pueblo Nuevo	-38.73	-72.56	719	100	1036	-	17	Bonilla e Vidal (2011)
17	CL	Laguna Chica	-36.82	-73.13	235.3	15	1234.9	1943-1994	6	Araneda et al. (1999)
18	CO	Catalina	4.70	-75.75	10336	1350	2171	1987-1997	11	Hoyos et al. (2005)
19	CO	Jazmin	4.85	-75.70	10421	1600	2559	1987-1997	11	Hoyos et al. (2005)
20	CO	Cedral	4.70	-75.50	11421	2120	2665	1987-1997	11	Hoyos et al. (2005)
21	CO	Pta. Tratamiento	4.80	-75.70	15043	1450	2682	1987-1997	11	Hoyos et al. (2005)
22	CO	Agronomía	5.05	-75.48	5978	2150	1749	1990-1999	10	Echeverri e Obando (2010)
23	CO	La Sierra	4.98	-75.63	8860	1450	2632	1993-2002	10	Echeverri e Obando (2010)
24	CO	La Palma	5.00	-75.68	8859	1300	2648	1993-2002	10	Echeverri e Obando (2010)

Continua

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
25	CO	Granja Luker	5.08	-75.68	6939	1020	1932	1990-1999	10	Echeverri e Obando (2010)
26	CO	Neira	5.16	-75.31	7131	2080	2043	1991-2000	10	Echeverri e Obando (2010)
27	CO	La Cristalina	5.20	-75.43	7016	2340	1896	1991-2000	10	Echeverri e Obando (2010)
28	CO	Papayal	4.95	-75.48	6249	2220	1769	1991-2000	10	Echeverri e Obando (2010)
29	CO	Col. Dtal Agropecuario	5.53	-73.36	2550	2778	558.83	1992-2011	20	Martinez et al. (2015)
30	CO	Casa Amarilla	5.81	-73.01	3186	2497	558.83	1992-2011	20	Martinez et al. (2015)
31	CO	Los Azulejos	5.67	-73.20	3375	2682	804.08	1992-2011	20	Martinez et al. (2015)
32	CO	La Copa	5.62	-73.21	3038	2668	772.44	1992-2011	20	Martinez et al. (2015)
33	CO	Siachoque	5.51	-73.24	3001	2764	704.46	1992-2011	20	Martinez et al. (2015)
34	BR	Serra do Tepequém (RR)	3.76	-61.68	16697,96	1100	2215,9	-	11	Almeida D. et al. (2009)
35	BR	Serra do Tepequém (RR)	3.76	-61.68	11438,97	1100	2215,9	-	11	Almeida D. et al. (2009)
36	BR	Manaus (AM)	-3.00	-60.00	14129	63	2219	-	-	Medina e Oliveira Jr. (1987)
37	BR	Sete Lagoas (MG)	-19.25	-44.25	5835	732	1340	-	3	Marques et al. (1998)
38	BR	Itumirim (MG)	-21.32	-44.87	7626	1045	1450	1996-2003	8	Beskow et al. (2009)
39	BR	Açucena (MG)	-19.06	-42.54	18646	493	1481	2005-2008	4	Silva M. et al. (2010)
40	BR	Peçanha (MG)	-18.55	-42.54	9013	890	1100	2005-2008	4	Silva M. et al. (2010)
41	BR	Sto. Ant. Itambé (MG)	-18.45	-43.30	15280	720	1411	2005-2008	4	Silva M. et al. (2010)
42	BR	R. do Triângulo Mineiro (MG)	-19.02	-49.47	10000	589	1550	-	10	Mello et al. (2007)
43	BR	R. Vale do Rio Doce (MG)	-19.16	-42.21	10800	267	1450	-	10	Mello et al. (2007)
44	BR	R. Alto Paranaíba (MG)	-18.67	-48.79	11500	842	1560	-	10	Mello et al. (2007)
45	BR	R. Jequitinhonha (MG)	-16.63	-41.69	6000	570	693	-	10	Mello et al. (2007)
46	BR	R. Alto Sao Francisco (MG)	-18.14	-44.15	7000	775	1100	-	10	Mello et al. (2007)
47	BR	Lavras (MG)	-21.25	-45.01	6461	900	1530	-	15	Aquino et al. (2012)
48	BR	Bocaina de Minas (MG)	-22.13	-44.40	11669	1260	2264	2006-2010	5	Mello et al. (2012)
49	BR	São Caetano (PE)	-8.12	-36.04	1672	650	500	1967-1978	11	Cantalice et al. (2009)
50	BR	Catende (PE)	-8.40	-35.40	3601	160	700	1969-1974	-	Cantalice et al. (2009)
51	BR	Araripina (PE)	-7.50	-40.50	2860	630	719	1969-1978	9	Cantalice et al. (2009)

Continua

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
52	BR	Cabrobó (PE)	-8.40	-39.26	2518	336	446	1969-1977	9	Cantalice et al. (2009)
53	BR	Caruaru (PE)	-8.30	-36.00	1909	540	501	1960-1975	9	Cantalice et al. (2009)
54	BR	Enc. do Sul (RS)	-30.50	-52.50	5534	420	1279	-	31	Eltz et al. (2011)
55	BR	Rio Grande (RS)	-32.01	-52.15	5135	15	1162	1957-1981	23	Bazzano et al. (2010)
56	BR	Ijuí (RS)	-28.55	-53.90	8825	448	1667	-	31	Cassol et al. (2007)
57	BR	Florianópolis (SC)	-27.59	-48.65	7522	2	1638.2	1985-2012	27	Back e Poletto (2017)
58	BR	Urussanga (SC)	-28.51	-49.31	5665	49	1781.7	1980-2012	33	Valvassori e Back (2014)
59	BR	Campos Novos (SC)	-27.50	-51.10	6329	947	1754	1981-1990	10	Bertol I. (1994)
60	BR	Lages (SC)	-27.81	-50.16	5033	923	1556	1989-2012	24	Schick et al. (2014)
61	BR	Região do Cantão (TO)	-9.82	-49.35	14000	228	2100	1985-2009	25	Viola et al. (2014)
62	BR	R. Bico do Papagaio (TO)	-5.70	-47.73	10000	187	1750	1985-2009	25	Viola et al. (2014)
63	BR	Magé (RJ)	-22.48	-43.00	15806	640	3006	1980-1995	16	Gonçalves et al. (2006)
64	BR	Saquarema (RJ)	-22.85	-42.55	5448	10	1252	1980-1994	15	Gonçalves et al. (2006)
65	BR	Mococa (SP)	-21.27	-47.00	7747	600	-	-	-	Mello et al. (2015)
66	BR	Piracicaba (SP)	-22.70	-47.62	4933	566	-	-	-	Mello et al. (2015)
67	BR	Piraju (SP)	-23.21	-49.23	7074	571	1482	-	23	Roque et al. (2001)
68	BR	Teodoro Sampaio (SP)	-22.61	-52.16	7172	255	1282	-	19	Colodoro et al. (2002)
69	BR	Itaoca (SP)	-24.65	-48.83	7467	180	1327.62	-	-	Silva et al. (2010)
70	BR	Sete Barras (SP)	-24.38	-47.93	8921	20	1582.53	-	9	Silva et al. (2010)
71	BR	São Miguel (SP)	-22.75	-48.50	7487	520	1557.7	1950-1998	49	Moreti et al. (2003)
72	BR	Poxoréo (MT)	-13.47	-52.27	8652	430	1688	1991-2007	31	Almeida C. et al. (2012)
73	BR	Diamantino (MT)	-14.40	-56.45	8240	286,3	-	-	15	Mello et al. (2015)
74	BR	Morinhos (GO)	-17.30	-48.80	8342	826	1535	1973-2002	30	Cabral et al. (2005)
75	BR	Goiânia (GO)	-16.68	-50.13	8353	750	1280	-	5	Silva et al. (1997)
76	BR	Ponte Meia (GO)	-18.33	-49.51	7167	468	1356	1973-2002	30	Cabral et al. (2005)
77	BR	Rio das Flores (RJ)	-22.00	-43.52	4118	400	1028	1989-1992	5	Gonçalves et al. (2006)
78	BR	Pirai (RJ)	-22.70	-43.75	6696	462	1451	1966-1983	15	Gonçalves et al. (2006)

Continua

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
79	BR	Pato Branco (PR)	-26.11	-52.68	11861	700	2027	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
80	BR	Guarapuava (PR)	-25.35	-51.50	9140	1020	1731	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
81	BR	Londrina (PR)	-23.36	-51.16	7945	585	1592	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
82	BR	Paranavaí (PR)	-23.41	-52.43	7340	480	1469	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
83	BR	Telêmaco Borba (PR)	-24.33	-50.61	7102	768	1431	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
84	BR	Curitiba (PR)	-25.45	-49.23	5937	884	1436	1986-2008	23	Waltrick et al. (2015)
85	BR	Pedra Branca (CE)	-5.45	-39.71	6740	500	840	-	30	Cabral et al. (2014)
86	BR	Parnaíba (PI)	-3.08	-41.76	9964,3	79,5	1268	2005-2009	5	Santos Jr. A. (2011)
87	BR	Teresina (PI)	-5.08	-42.81	9655	74,36	1559	2005-2009	5	Santos Jr. A. (2011)
88	BR	Marabá (PA)	-5.45	-49.10	13915	98	1969	-	-	Oliveira et al. (2012)
89	BR	Rondon do Pará (PA)	-4.78	-48.07	16390	191	1710	1999-2015	17	Rosa et al. (2016)
90	BR	Belém (PA)	-1.41	-48.44	11488	21	-	1970-1984	-	Mello et al. (2015)
91	BR	BH do Rio Apeú (PA)	-1.34	-47.98	22001	20	2598,8	-	39	Albuquerque J. (2013)
92	VE	Banco de LosCedros	8.57	-69.43	10939	125	1503	1980-1991	12	Lujan e Gabriels (2005)
93	VE	Carora Granja	10.16	-70.08	2897	413	458	1978-1998	21	Lujan e Gabriels (2005)
94	VE	Bobare	10.29	-69.46	2375	660	378	1978-1997	20	Lujan e Gabriels (2005)
95	UY	Artigas	-30.40	-56.50	7852	110	1514	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
96	UY	Carrasco	-34.80	-56.00	4274	24	1175	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
97	UY	Chuy	-33.70	-53.50	4286	8	1174	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
98	UY	Dionisio	-32.90	-54.30	5469	190	1330	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
99	UY	Melo	-32.40	-54.20	6038	147	1395	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
100	UY	Mercedes	-33.30	-58.10	4739	44	1181	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
101	UY	Pintos	-33.90	-56.80	4453	97	1183	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
102	UY	Punta del Este	-35.00	-55.00	3911	10	1132	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
103	UY	Rivera	-30.89	-55.50	8445	216	1602	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
104	UY	Rocha	-34.50	-54.30	4910	30	1264	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
105	UY	Salto	-31.40	-58.00	6548	22	1334	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)

Continua

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
106	UY	Trinidad	-33.50	-57.00	5048	115	1263	1980-2009	30	Pérez et al. (2017)
107	PE	Altos de Poclús	-4.55	-79.54	669.34	3070	725,6	2009-2014	6	Cordova Y. E. (2015)
108	PE	Laive	-12.25	-75.36	1160.1	3842	711.5	2000-2013	14	Solano P. R. (2016)
109	PE	Ricrán	-11.53	-75.52	1186.6	3580	780.6	2000-2013	14	Solano P. R. (2016)
110	PE	Runatullo	-11.61	-75.01	1494.1	3498	1091.2	2000-2013	14	Solano P. R. (2016)
111	PE	Viques	-12.15	-75.22	1136.8	3218	664.6	2000-2013	14	Solano P. R. (2016)
112	AR	Campo Gallo	-26.58	-62.85	380	193	602	-	-	Gaitán et al. (2017)
113	AR	Formosa	-26.19	-58.22	956	61	1427	-	-	Gaitán et al. (2017)
114	AR	Bella Vista	-28.51	-59.04	858	70	1338	-	-	Gaitán et al. (2017)
115	AR	Mercedes	-29.19	-58.07	917	100	1408	-	-	Gaitán et al. (2017)
116	AR	Ceres	-29.88	-61.95	637	90	930	-	-	Gaitán et al. (2017)
117	AR	Reconquista	-29.15	-59.65	809	46	1305	-	-	Gaitán et al. (2017)
118	AR	Rosario	-32.94	-60.65	591	29	977	-	-	Gaitán et al. (2017)
119	AR	Venado Tuerto	-33.75	-61.97	570	110	949	-	-	Gaitán et al. (2017)
120	AR	Sauce Viejo	-31.77	-60.84	581	19	1045	-	-	Gaitán et al. (2017)
121	AR	Córdoba	-31.42	-64.19	363	420	803	-	-	Gaitán et al. (2017)
122	AR	Marcos Juarez	-32.70	-62.11	520	112	907	-	-	Gaitán et al. (2017)
123	AR	Río Cuarto	-33.12	-64.35	445	447	826	-	-	Gaitán et al. (2017)
124	AR	Gral Cabrera	-32.81	-63.87	440	296	829	-	-	Gaitán et al. (2017)
125	AR	Sacanta	-31.66	-63.05	500	166	856	-	-	Gaitán et al. (2017)
126	AR	Ballesteros	-32.54	-62.98	503	160	868	-	-	Gaitán et al. (2017)
127	AR	Alejo Ledesma	-33.61	-62.62	501	130	920	-	-	Gaitán et al. (2017)
128	AR	OlaEta	-33.05	-63.91	400	292	848	-	-	Gaitán et al. (2017)
129	AR	Rosales	-34.17	-63.15	400	135	911	-	-	Gaitán et al. (2017)
130	AR	Canals	-33.56	-62.89	472	127	910	-	-	Gaitán et al. (2017)
131	AR	Noetinger	-32.36	-62.31	517	114	897	-	-	Gaitán et al. (2017)
132	AR	Laborde	-33.15	-62.86	502	128	900	-	-	Gaitán et al. (2017)

Continúa

Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
133	AR	Ordoñez	-32.84	-62.87	505	136	886	-	-	Gaitán et al. (2017)
134	AR	Oncativo	-31.91	-63.68	404	285	820	-	-	Gaitán et al. (2017)
135	AR	Villa del Rosario	-31.56	-63.54	450	270	840	-	-	Gaitán et al. (2017)
136	AR	Manfredi	-31.85	-63.75	403	295	817	-	-	Gaitán et al. (2017)
137	AR	Azul	-36.78	-59.85	406	137	1000	-	-	Gaitán et al. (2017)
138	AR	Dolores	-36.32	-57.68	383	9	974	-	-	Gaitán et al. (2017)
139	AR	Junín	-34.59	-60.95	520	84	1003	-	-	Gaitán et al. (2017)
140	AR	Las Flores	-36.01	-59.10	360	38	997	-	-	Gaitán et al. (2017)
141	AR	9 de Julio	-35.44	-60.89	488	79	1016	-	-	Gaitán et al. (2017)
142	AR	Cnel. Suarez	-37.46	-61.93	343	240	869	-	-	Gaitán et al. (2017)
143	AR	Pehuajó	-35.81	-61.90	412	86	1001	-	-	Gaitán et al. (2017)
144	AR	Pergamino	-33.89	-60.58	524	65	1013	-	-	Gaitán et al. (2017)
145	AR	Gral. Pico	-35.66	-63.76	449	136	867	-	-	Gaitán et al. (2017)
146	AR	Comechingones	-33.29	-66.27	210	823	506	-	-	Gaitán et al. (2017)
147	AR	Famaillá	-27.06	-65.40	717	363	1106	-	-	Gaitán et al. (2017)
148	AR	Tucumán	-26.81	-65.22	619	405	938	-	-	Gaitán et al. (2017)
149	AR	Orán	-23.13	-64.32	528	360	857	-	-	Gaitán et al. (2017)
150	AR	Salta	-24.78	-65.42	330	1250	691	-	-	Gaitán et al. (2017)
151	AR	Tartagal	-22.52	-63.81	563	511	956	-	-	Gaitán et al. (2017)
152	AR	San Salvador de Jujuy	-24.19	-65.30	401	1291	987	-	-	Gaitán et al. (2017)
153	AR	La Paz	-30.79	-59.64	705	47	1182	-	-	Gaitán et al. (2017)
154	AR	Paraná	-31.74	-60.51	621	42	1090	-	-	Gaitán et al. (2017)
155	AR	Diamante	-32.07	-60.64	581	81	1050	-	-	Gaitán et al. (2017)
156	AR	Gualeguay	-33.15	-59.31	584	7	1126	-	-	Gaitán et al. (2017)
157	AR	Gualeguaychú	-33.01	-58.51	596	28	1132	-	-	Gaitán et al. (2017)
158	AR	Concepción del Uruguay	-32.49	-58.23	624	12	1170	-	-	Gaitán et al. (2017)
159	AR	Colón	-32.23	-58.15	682	22	1194	-	-	Gaitán et al. (2017)

Continúa

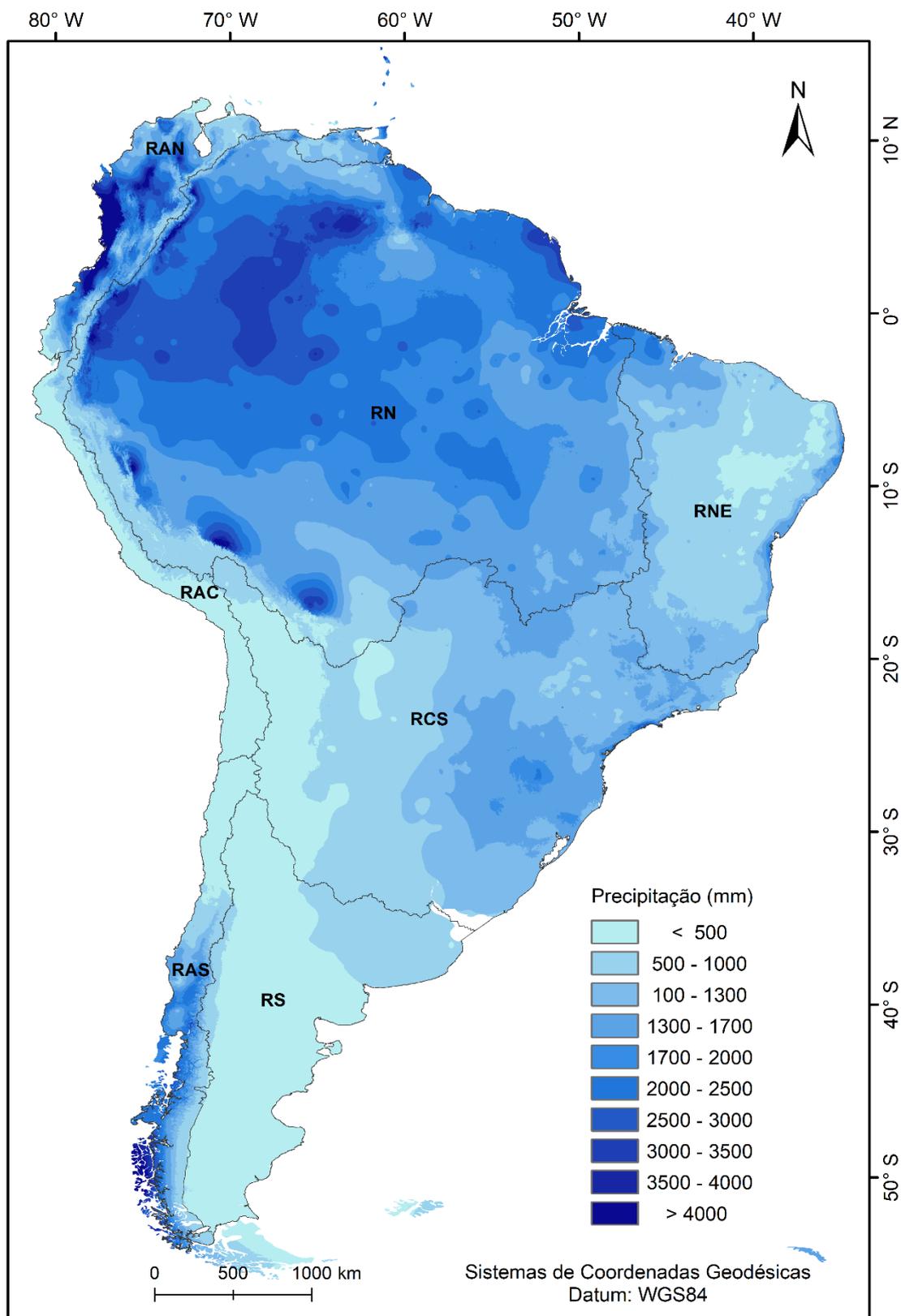
Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
160	AR	Concordia	-31.39	-58.02	728	31	1334	-	-	Gaitán et al. (2017)
161	AR	Federación	-30.99	-57.92	768	52	1365	-	-	Gaitán et al. (2017)
162	AR	Feliciano	-30.39	-58.75	755	62	1293	-	-	Gaitán et al. (2017)
163	AR	Federal	-30.95	-58.79	700	67	1247	-	-	Gaitán et al. (2017)
164	AR	Villaguay	-31.87	-59.03	684	55	1136	-	-	Gaitán et al. (2017)
165	AR	Tala	-32.34	-59.37	620	77	1137	-	-	Gaitán et al. (2017)
166	AR	Nogoyá	-32.39	-59.79	586	47	1125	-	-	Gaitán et al. (2017)
167	AR	Colonia Benítez	-27.33	-58.95	946	52	1321	-	-	Gaitán et al. (2017)
168	AR	Las Breñas	-27.09	-61.08	621	100	961	-	-	Gaitán et al. (2017)
169	AR	Roque Sáenz Peña	-26.79	-60.44	656	91	1051	-	-	Gaitán et al. (2017)
170	AR	Resistencia	-27.47	-59.00	933	57	1320	-	-	Gaitán et al. (2017)
171	AR	Castelli	-25.95	-60.62	673	15	900	-	-	Gaitán et al. (2017)
172	AR	Villa Ángela	-27.58	-60.71	657	80	1061	-	-	Gaitán et al. (2017)
173	AR	Dolores	-36.32	-57.68	3830	9	-	1950-2005	56	Saluso J.H. (2008)
174	AR	Coronel Suárez	-37.46	-61.93	3430	240	-	1950-2005	56	Saluso J.H. (2008)
175	AR	Marcos Juárez	-32.69	-62.10	5200	112	-	1950-2005	56	Saluso J.H. (2008)
176	AR	Bella Vista	-28.43	-58.92	8580	70	-	1950-2005	56	Saluso J.H. (2008)
177	BO	Angosto Molinero	-17.98	-65.63	281.13	2560	773.731	1972-1984	13	García e Trelles (2015)
178	BO	Pasorapa	-18.43	-64.67	274.25	2090	490.6	1978-1978	1	García e Trelles (2015)
179	BO	Pocona	-17.65	-65.37	510.82	2658	812.00	1956-1982	27	García e Trelles (2015)
180	BO	Pojo	-17.75	-64.86	615.09	1900	565.00	1976-1985	10	García e Trelles (2015)
181	BO	Pte, Taperas	-18.15	-64.68	433.24	1400	332.77	1969-1983	15	García e Trelles (2015)
182	BO	Pte, Arce	-18.61	-65.15	218.77	1514	440.9	1982-2009	28	García e Trelles (2015)
183	BO	Sacabamba	-17.80	-65.80	314.55	3174	589.2	1972-1983	12	García e Trelles (2015)
184	BO	Santa Rosa	-17.12	-66.70	820.07	2552	637.55	2009-2017	9	García e Trelles (2015)
185	BO	Sehuencas	-17.58	-65.30	792.55	3000	2929.07	1978-1984	7	García e Trelles (2015)
186	BO	Tiraque	-17.42	-64.72	456.77	3304	497.7	1957-2016	60	García e Trelles (2015)

Continúa

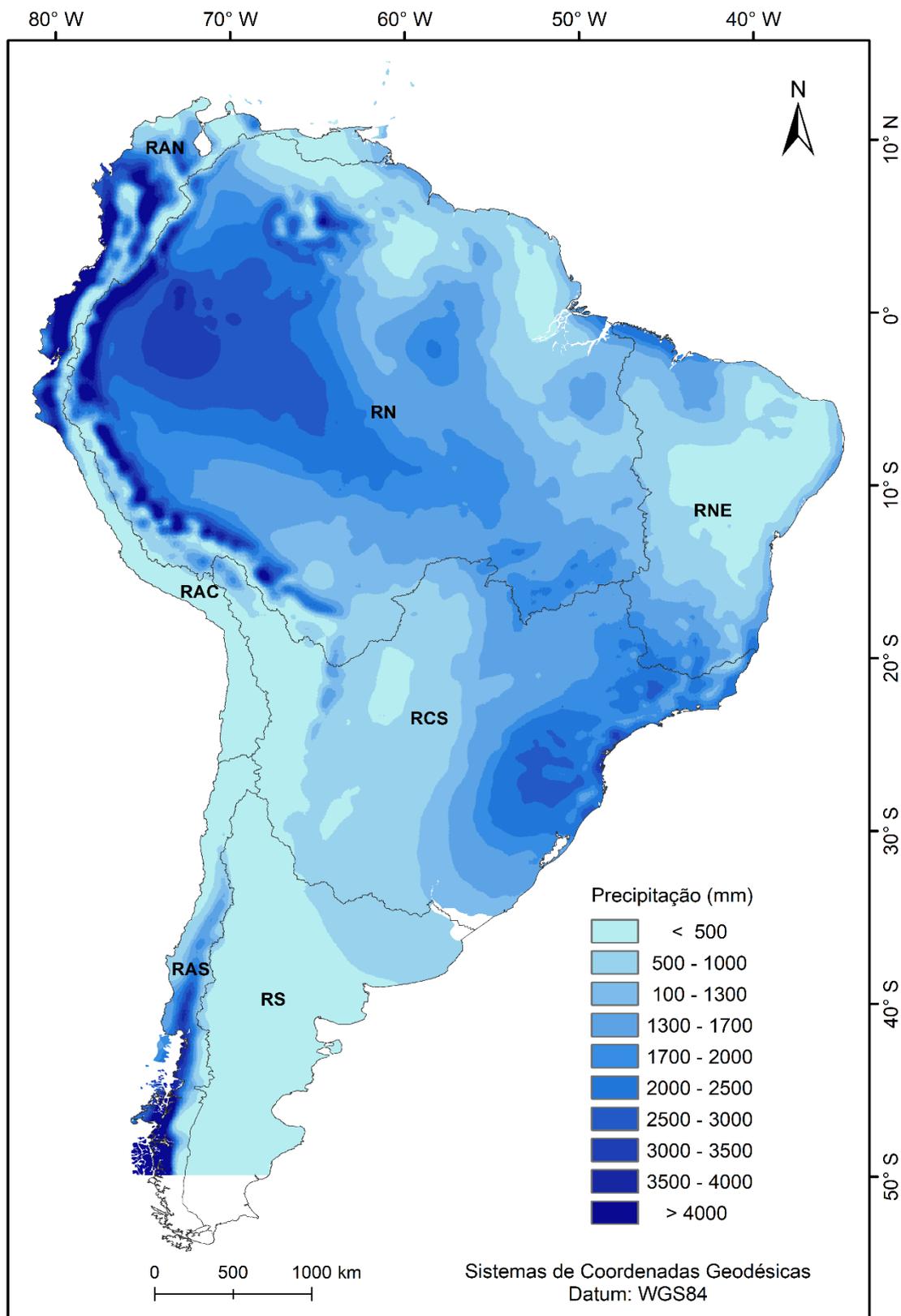
Número	País	Localidade	Latitude	Longitude	El ₃₀	Altitude (m)	Pm(mm)	Período	Anos	Referência
187	BO	Vallegrande	-18.47	-64.10	334.81	1998	512.13	1979-1990	12	García e Trelles (2015)
188	BO	Mizque	-17.94	-65.34	349.35	2045	487.29	1958-2016	59	García e Trelles (2015)
189	EC	Inamhi / Santa Ana	-1.20	-80.37	309.64	70	1332.51	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
190	EC	Teodomira - UTM	-1.17	-80.38	131.65	47	590.77	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
191	EC	24 de mayo - Jaboncillo	-1.32	-80.32	193.32	140	803.3	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
192	EC	Portoviejo - UTM	-1.04	-80.45	118.15	41	445.1	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
193	EC	Portoviejo - Aeropuerto	-1.05	-80.46	113.4	46	428.65	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
194	EC	Rocafuerte	-0.92	-80.45	97.38	21	368.13	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
195	EC	Río chico – Pechiche	-0.99	-80.41	205.97	43	822.18	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
196	EC	Chone	-0.63	-80.04	210.55	39	880.7	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
197	EC	Zapote	-0.91	-80.04	195.27	50	723.3	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
198	EC	Murucumba	-0.81	-79.62	548.72	64	1346.27	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
199	EC	Manta - Aeropuerto	-0.95	-80.68	100.05	12	402.3	2001-2010	10	Veliz J. J.(2015)
200	EC	Parsta	-4.10	-79.15	10249	3410	2429	2001-2010	10	Ochoa et al. (2016)
201	PY	Dpto. del Alto Paraná	-24.96	-54.96	7525	351	1725	1969-2006	37	Rodriguez C. R. (2012)

Fonte: Elaboração própria. 2019.

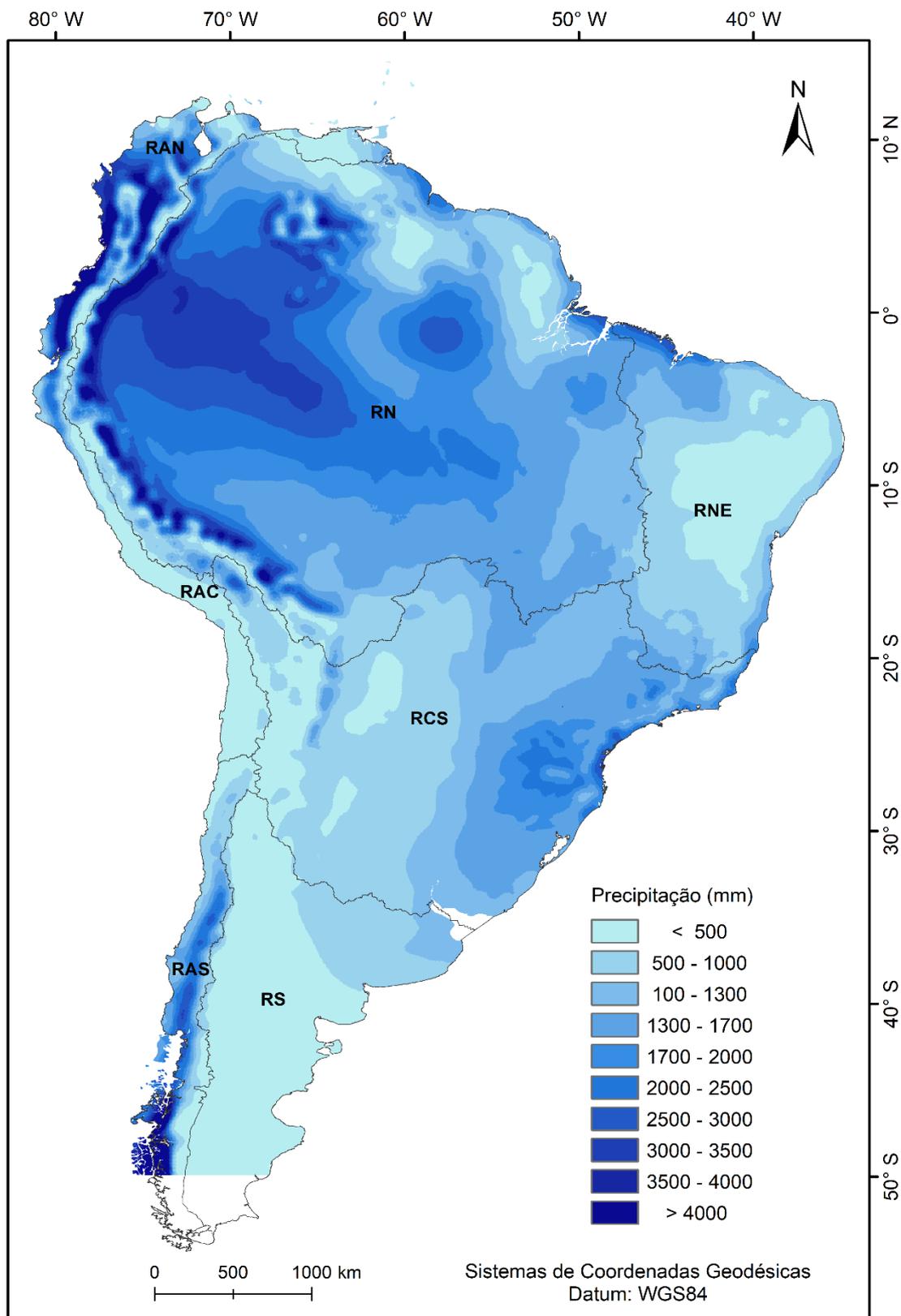
Apêndice B- Mapa de precipitação média anual da base de dados WorldClim, período 1950-2000.



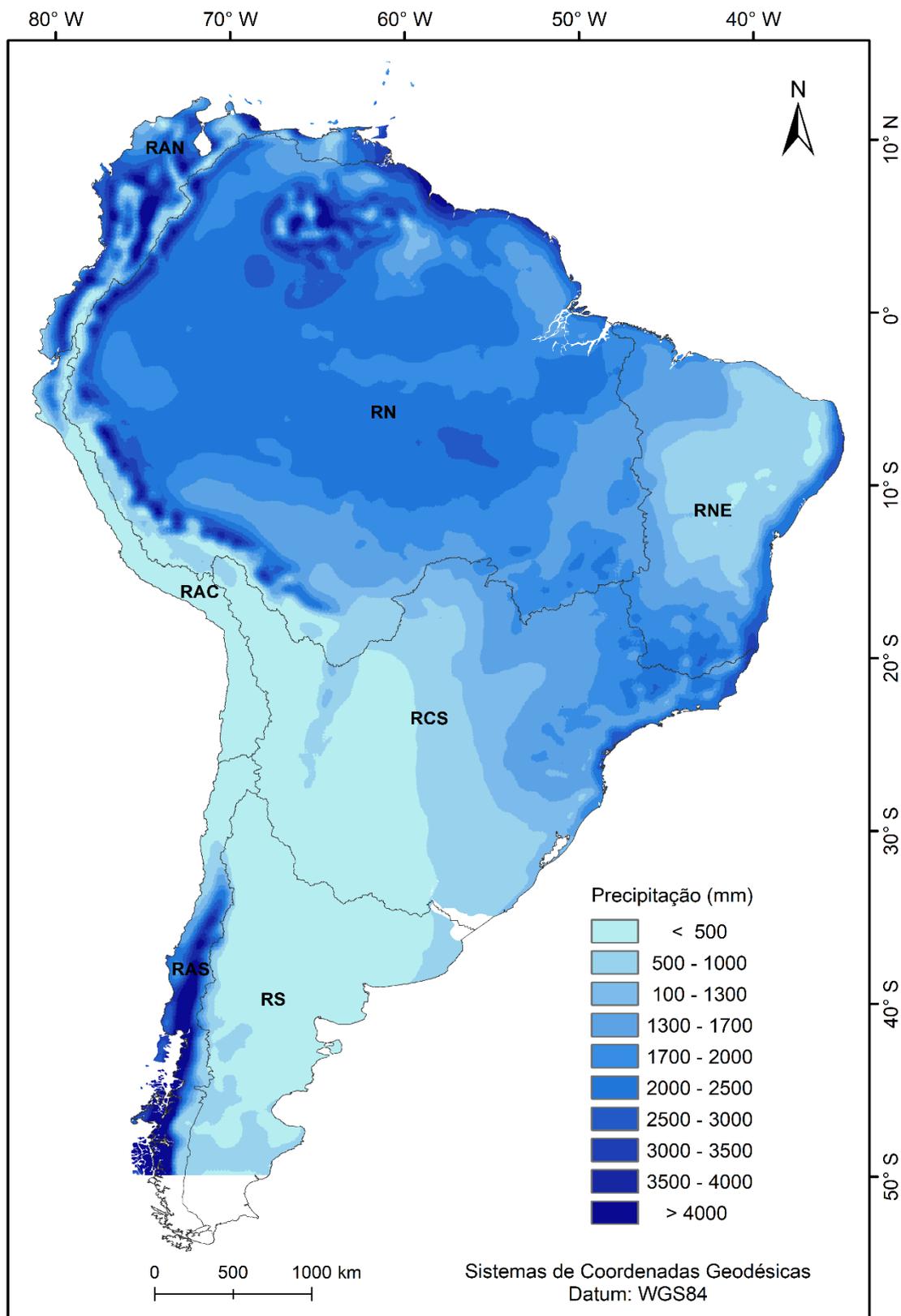
Apêndice C- Mapa de precipitação média anual simulado pelo modelo Eta-CaNESM2, período 1961-2005.



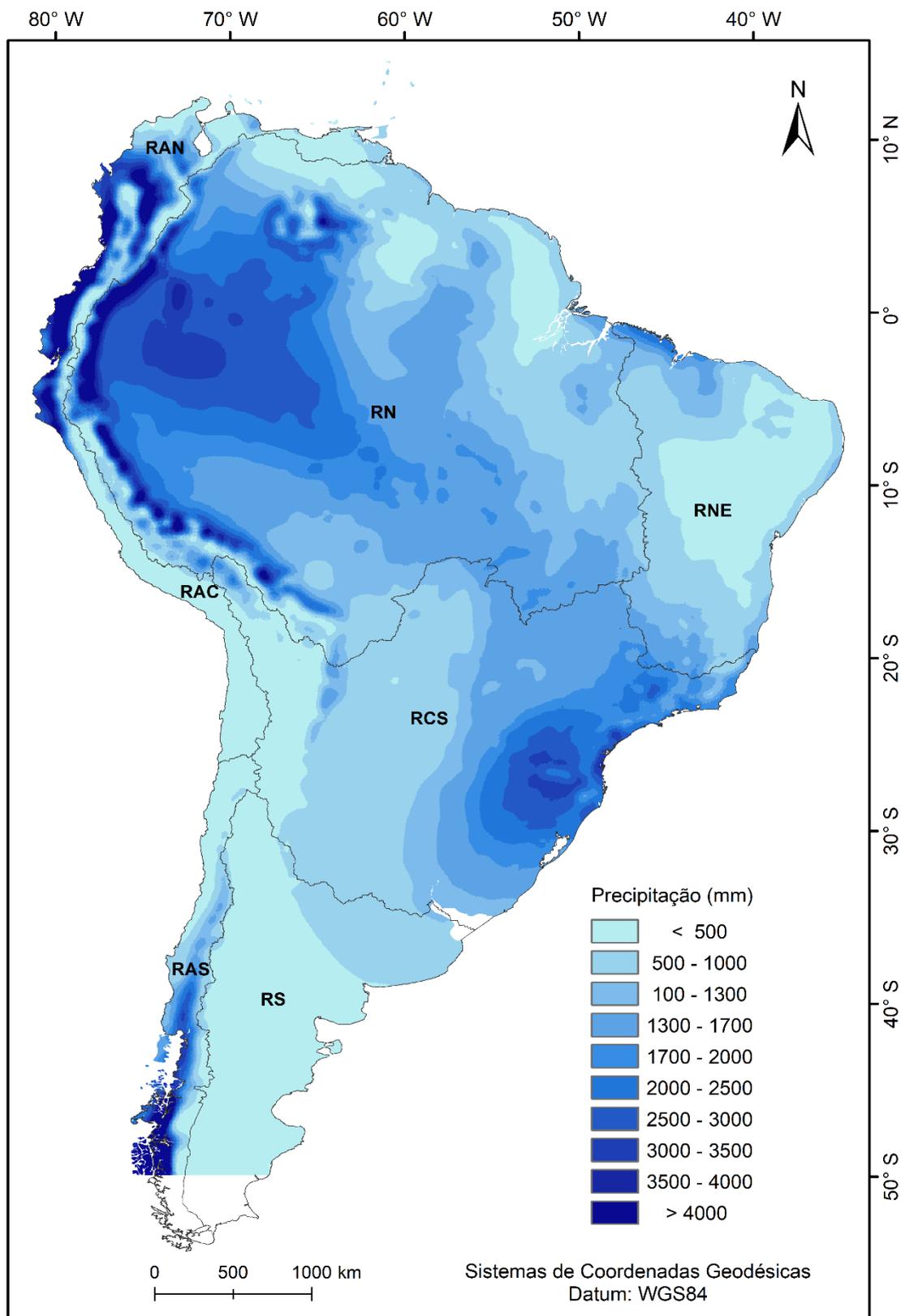
Apêndice D- Mapa de precipitação média anual simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, período 1961-2005.



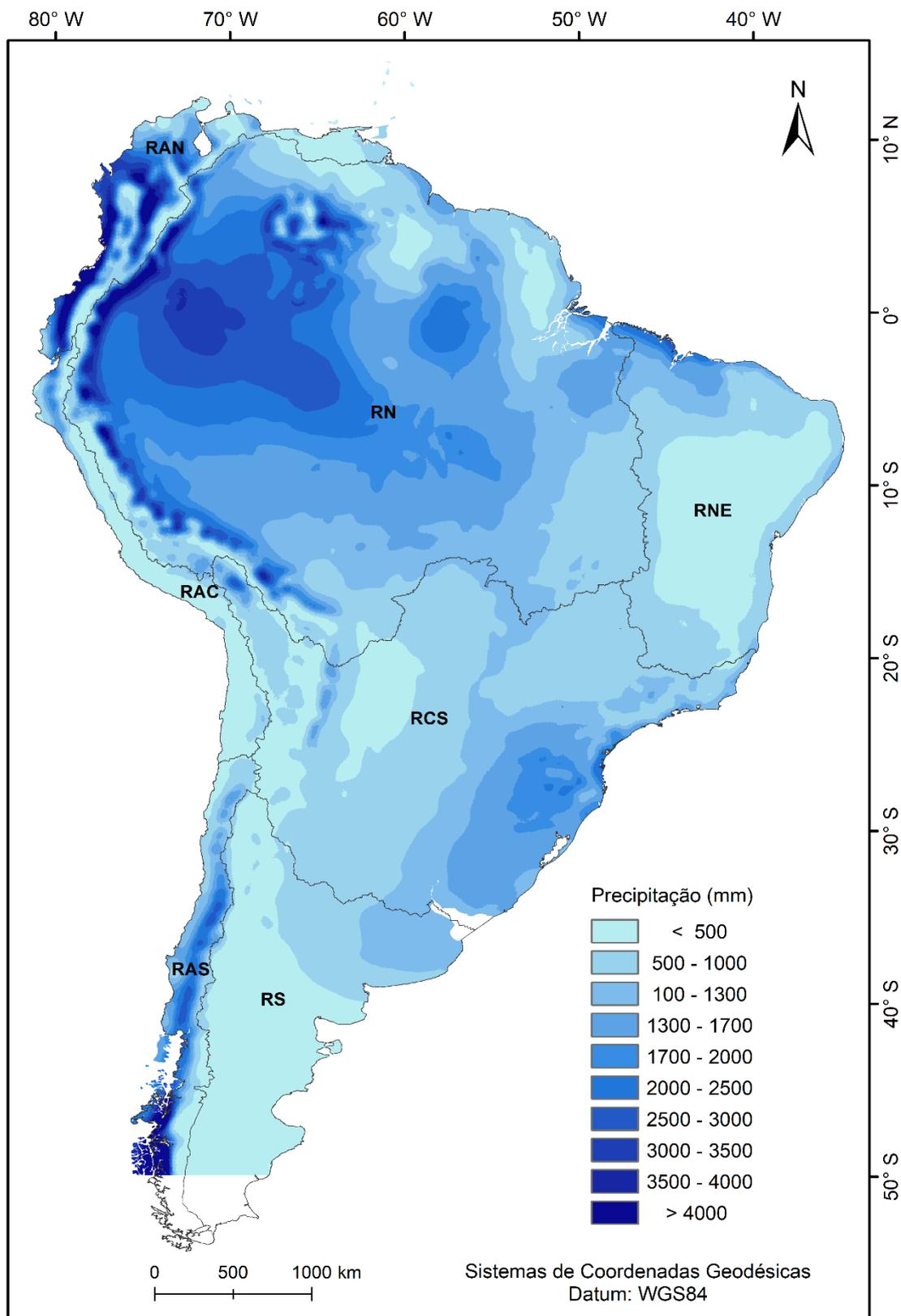
Apêndice E- Mapa de precipitação média anual simulado pelo modelo Eta-MIROC5, período 1961-2005.



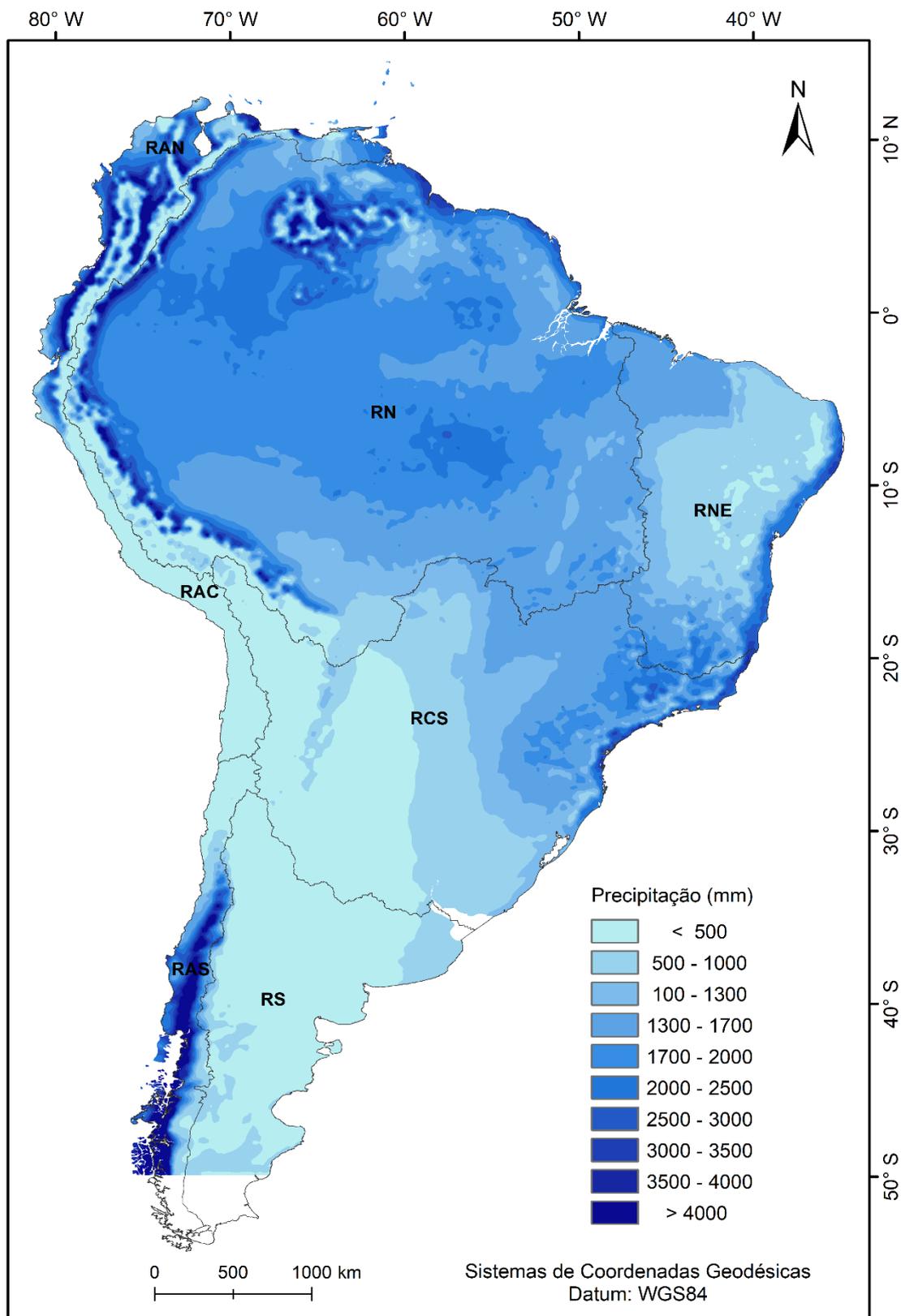
Apêndice F- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-CaNESM2.



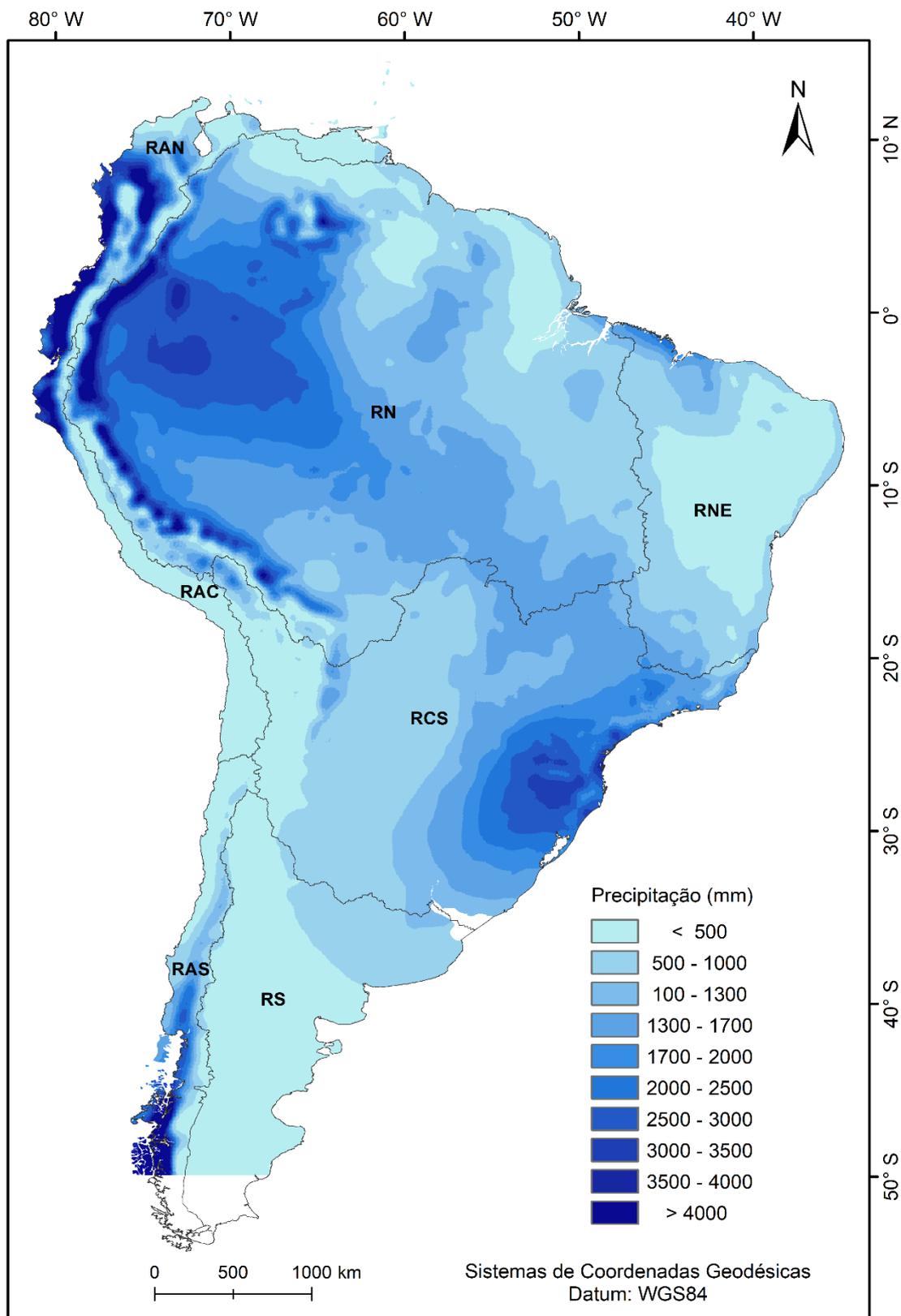
Apêndice G- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



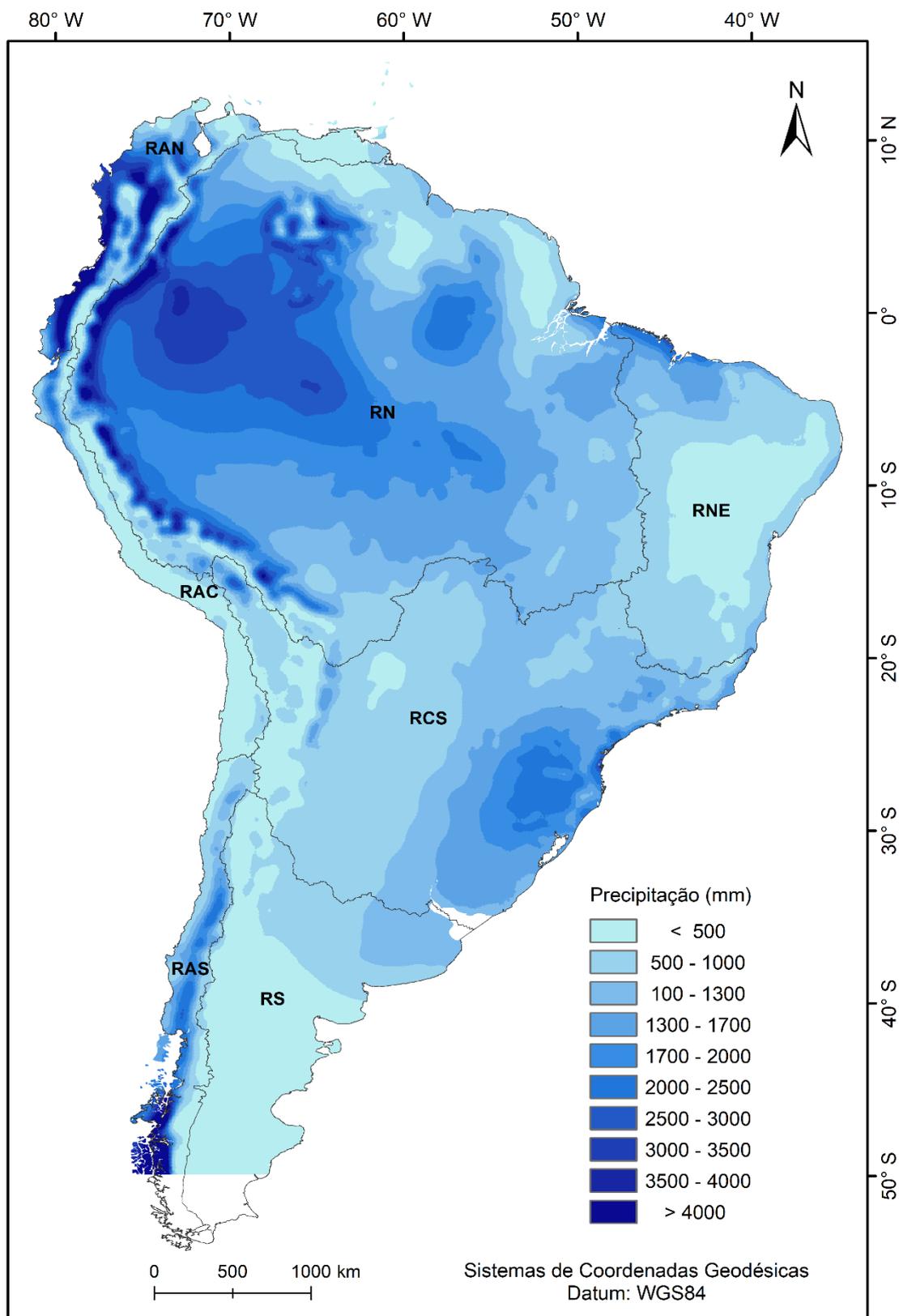
Apêndice H- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



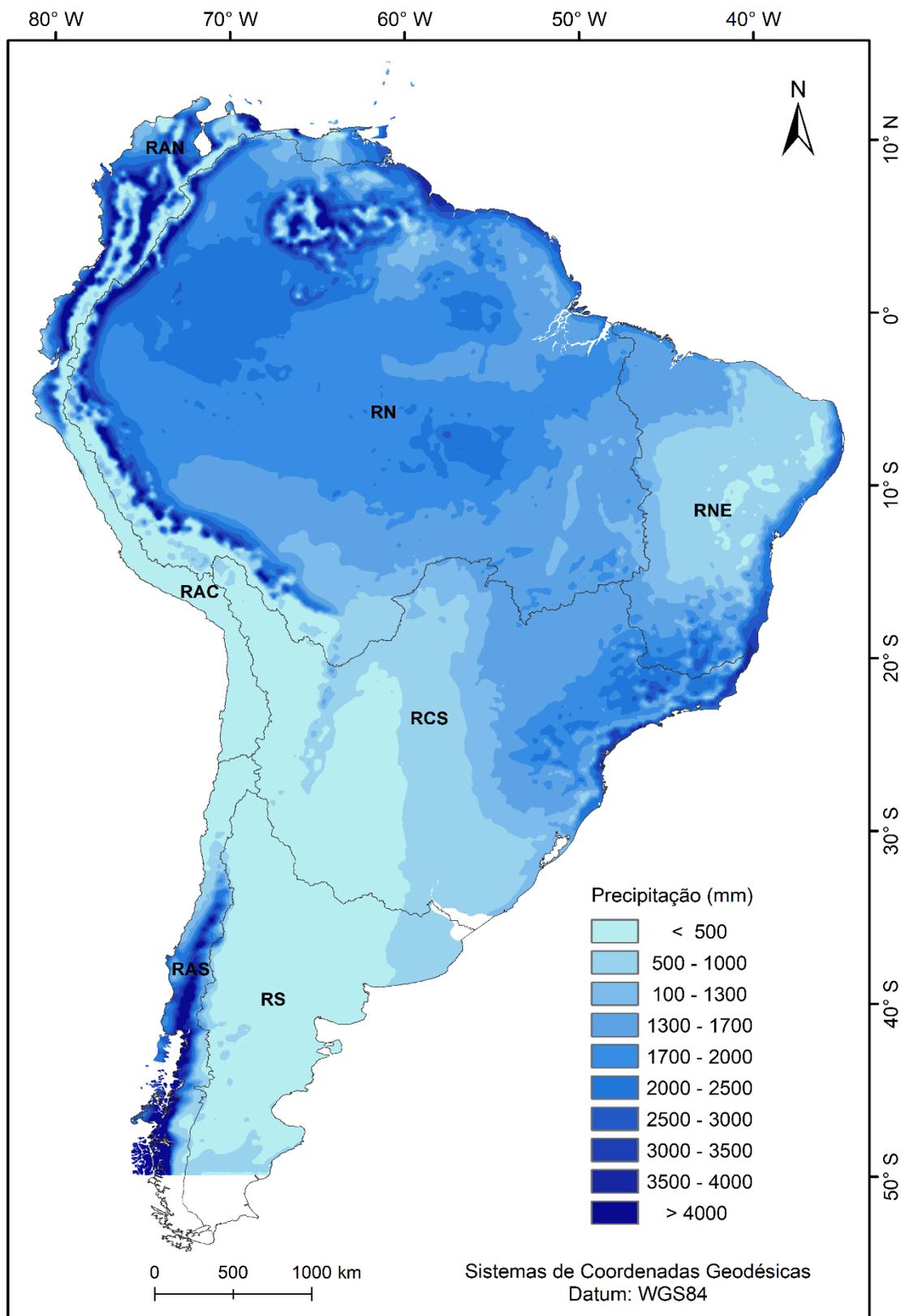
Apêndice I- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-CaNESM2.



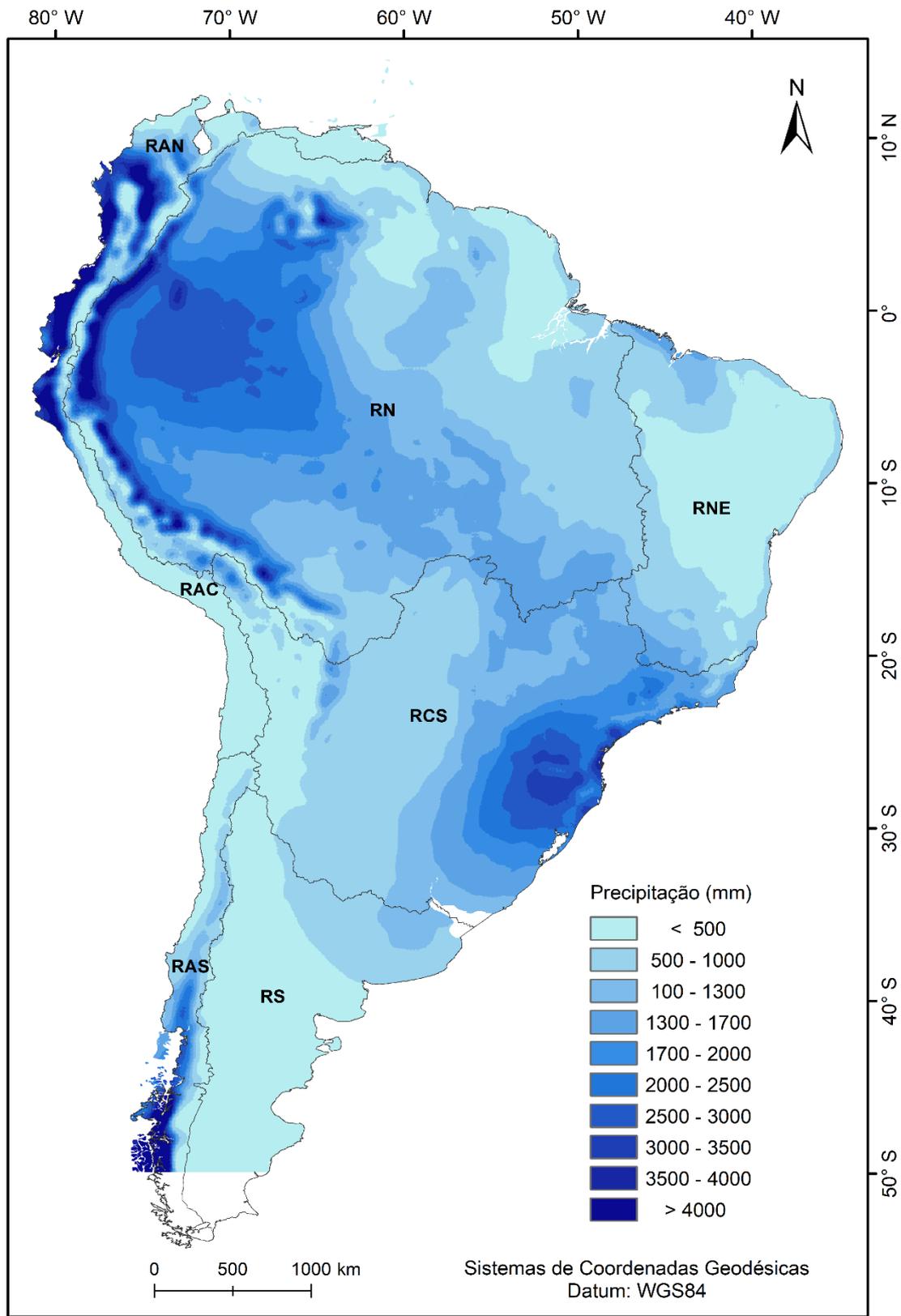
Apêndice J- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



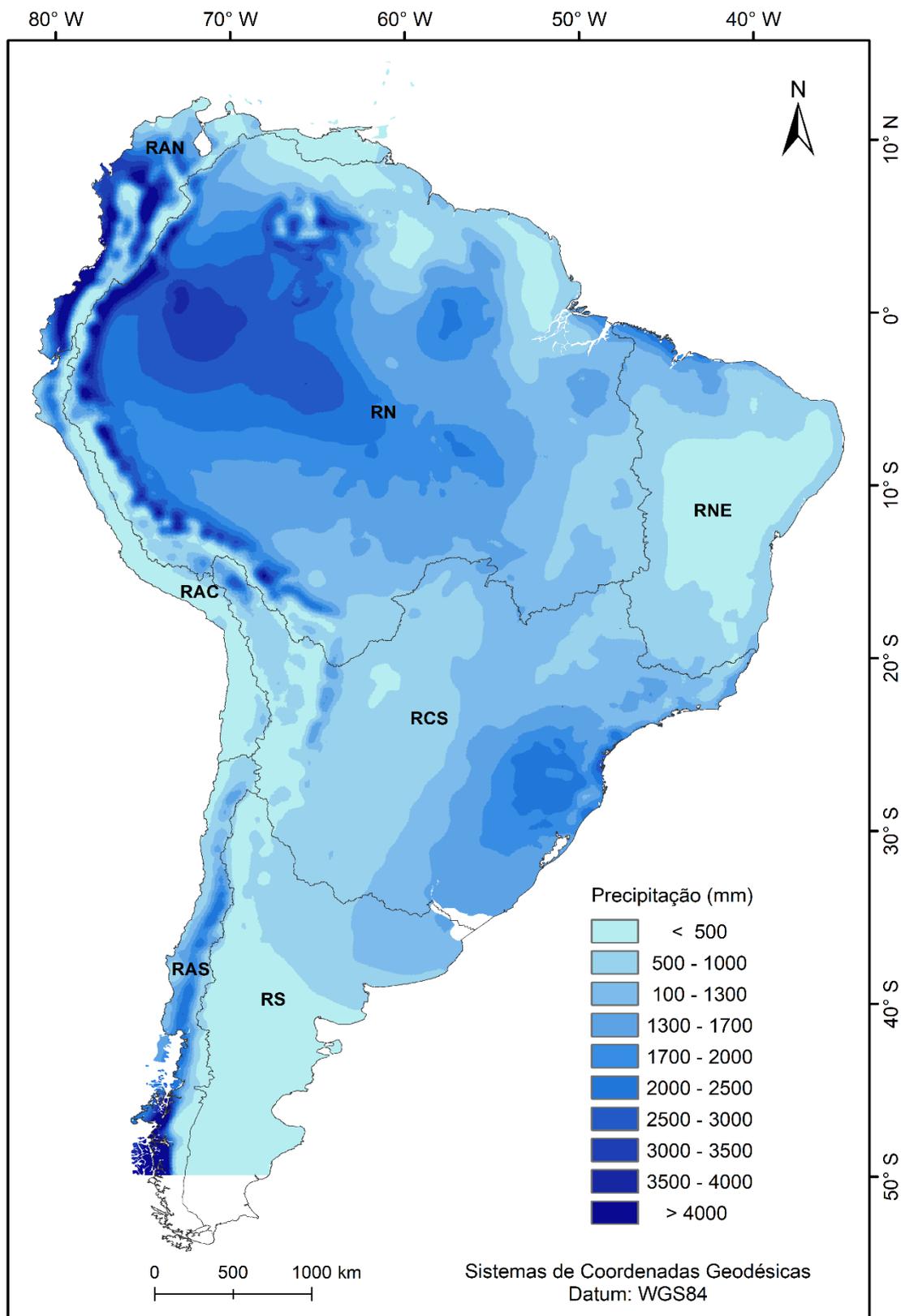
Apêndice K- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



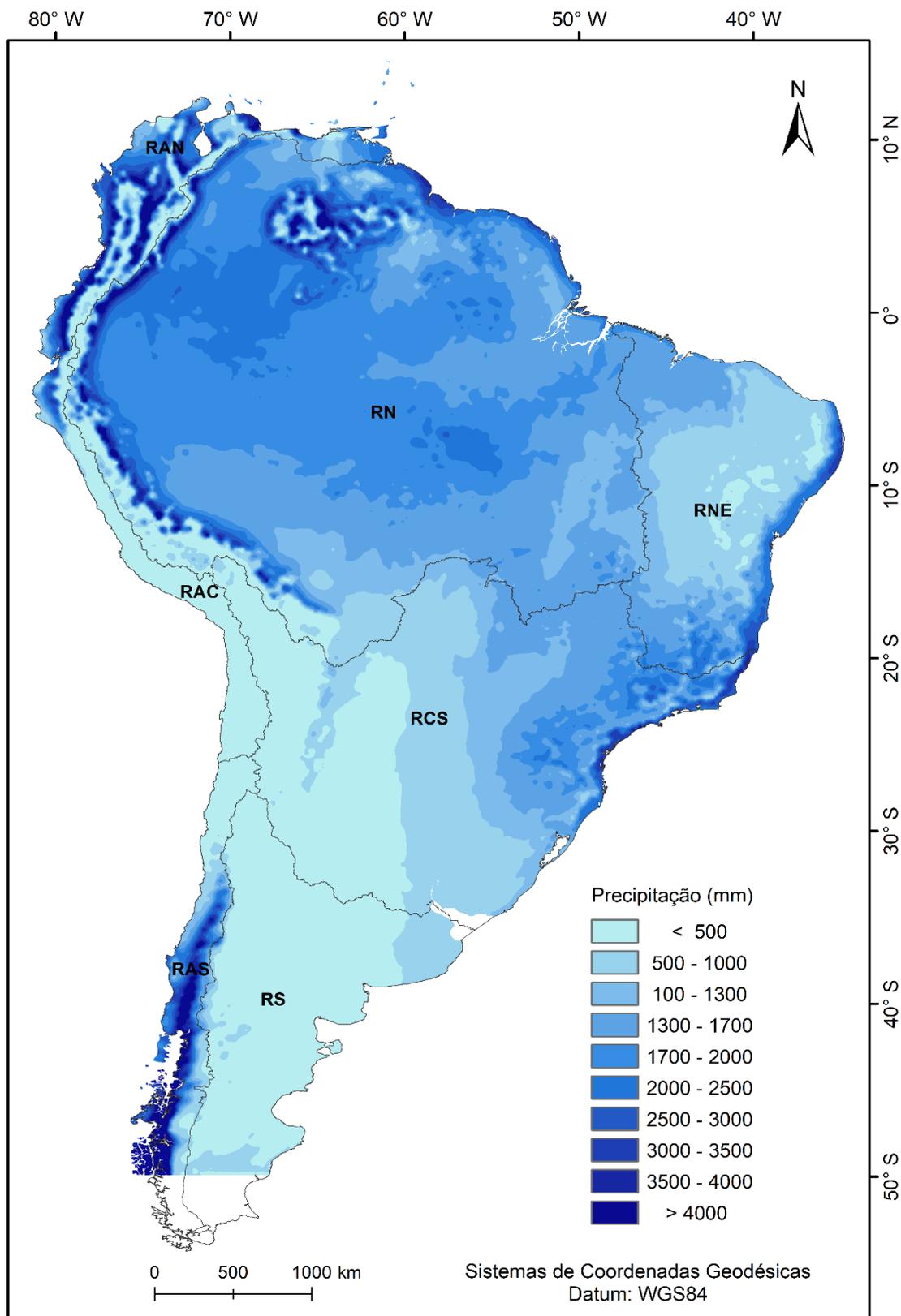
Apêndice L- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 Eta-CANESM2.



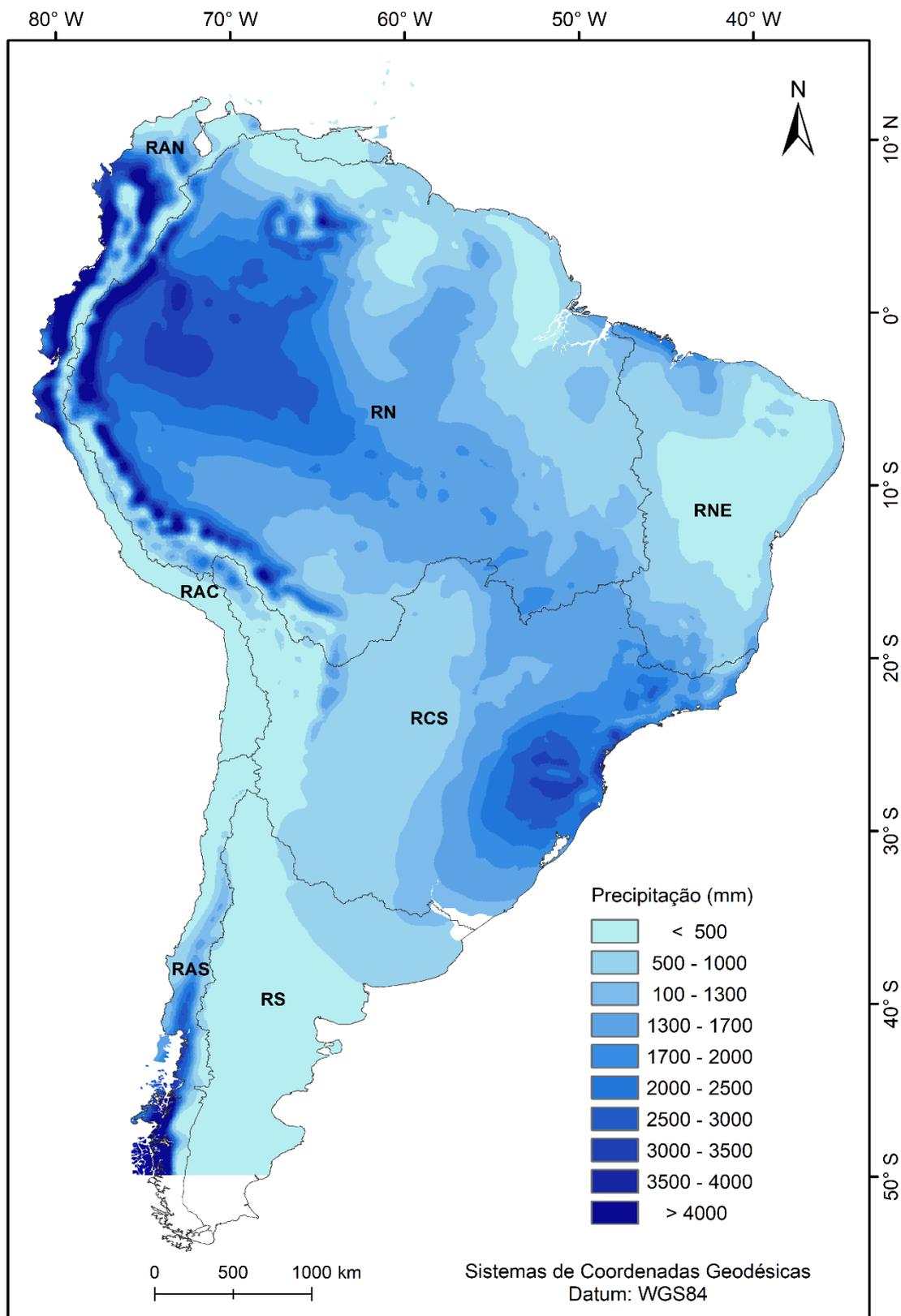
Apêndice M- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2098, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



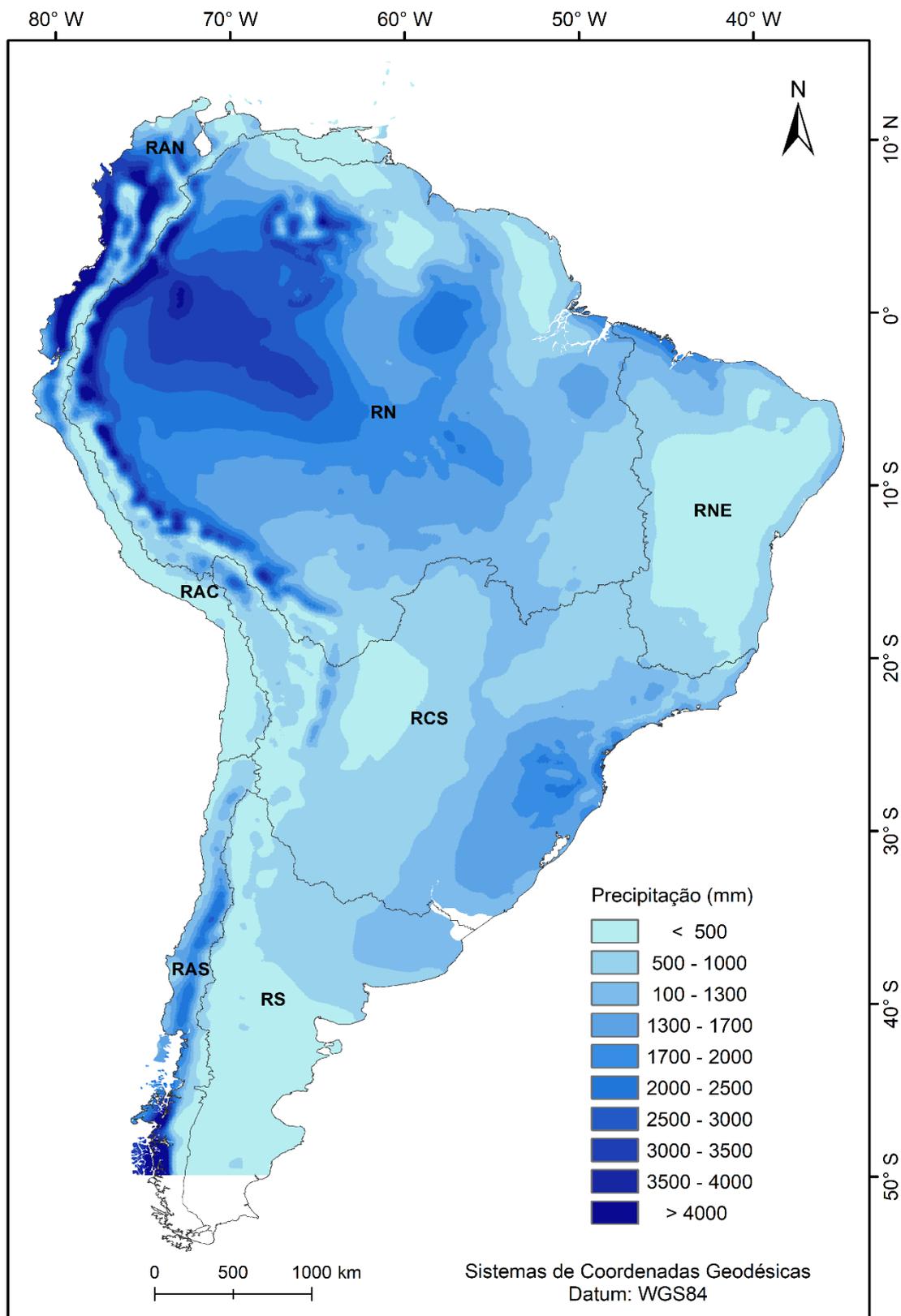
Apêndice N- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



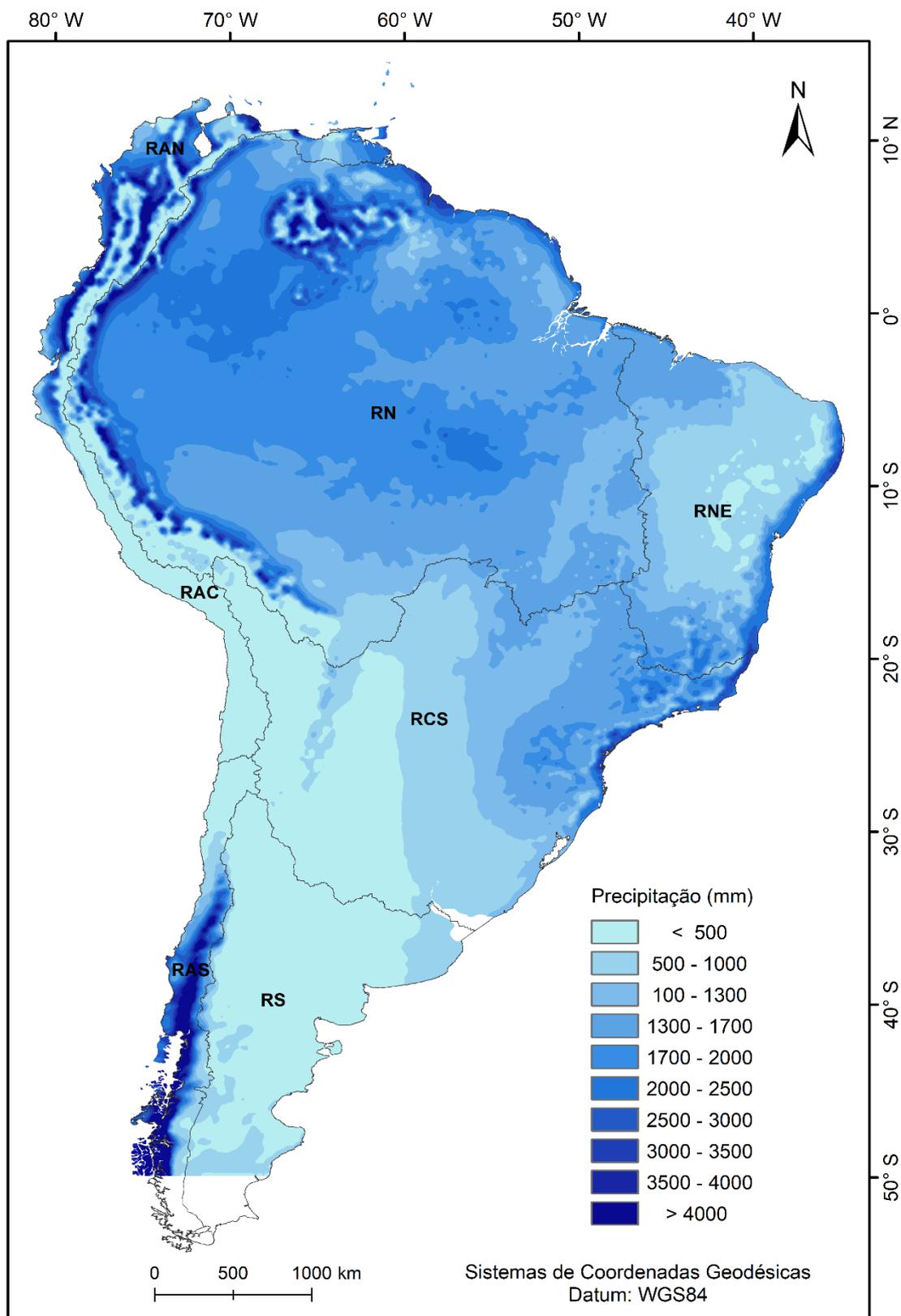
Apêndice O- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-CANESM2.



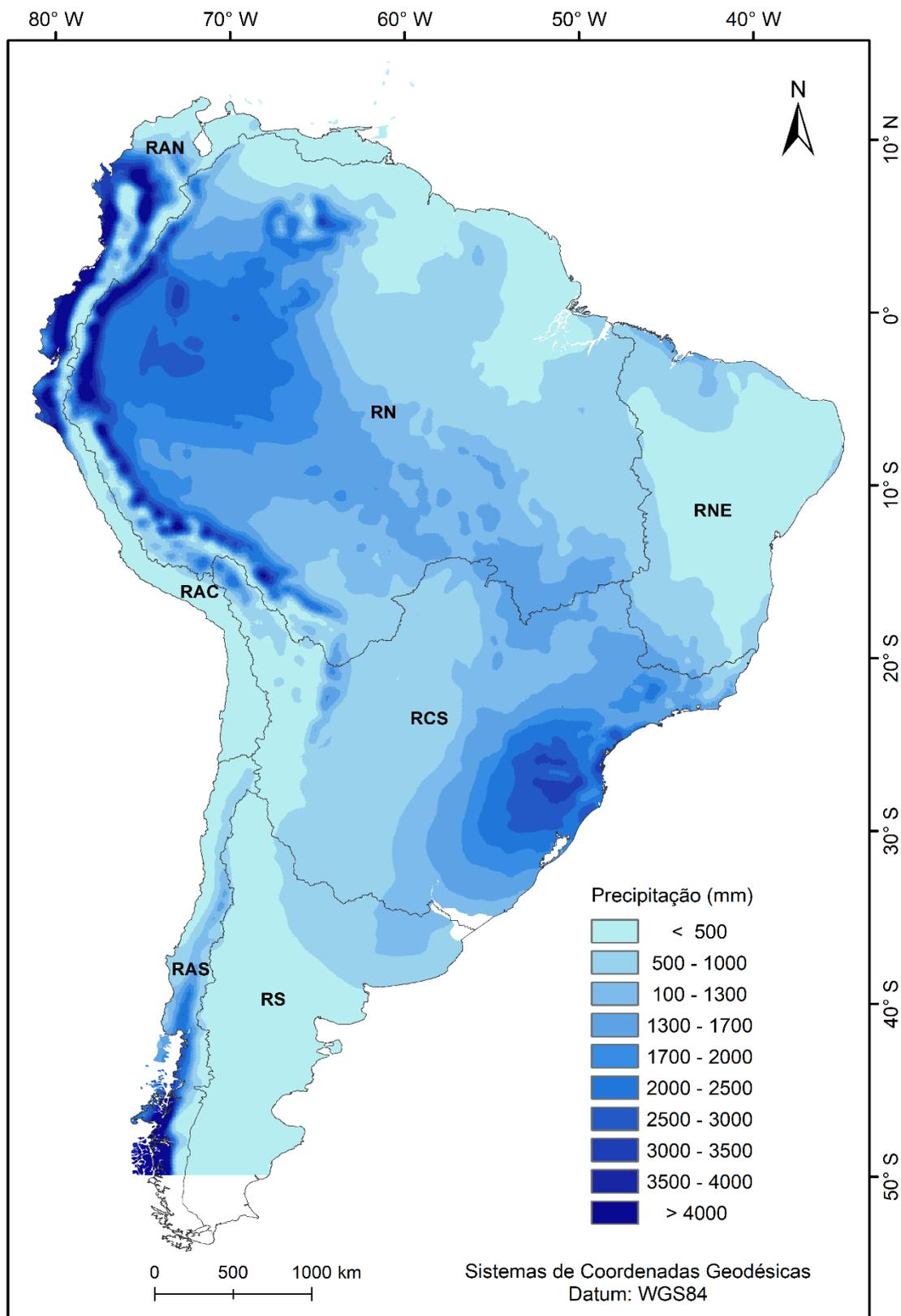
Apêndice P- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



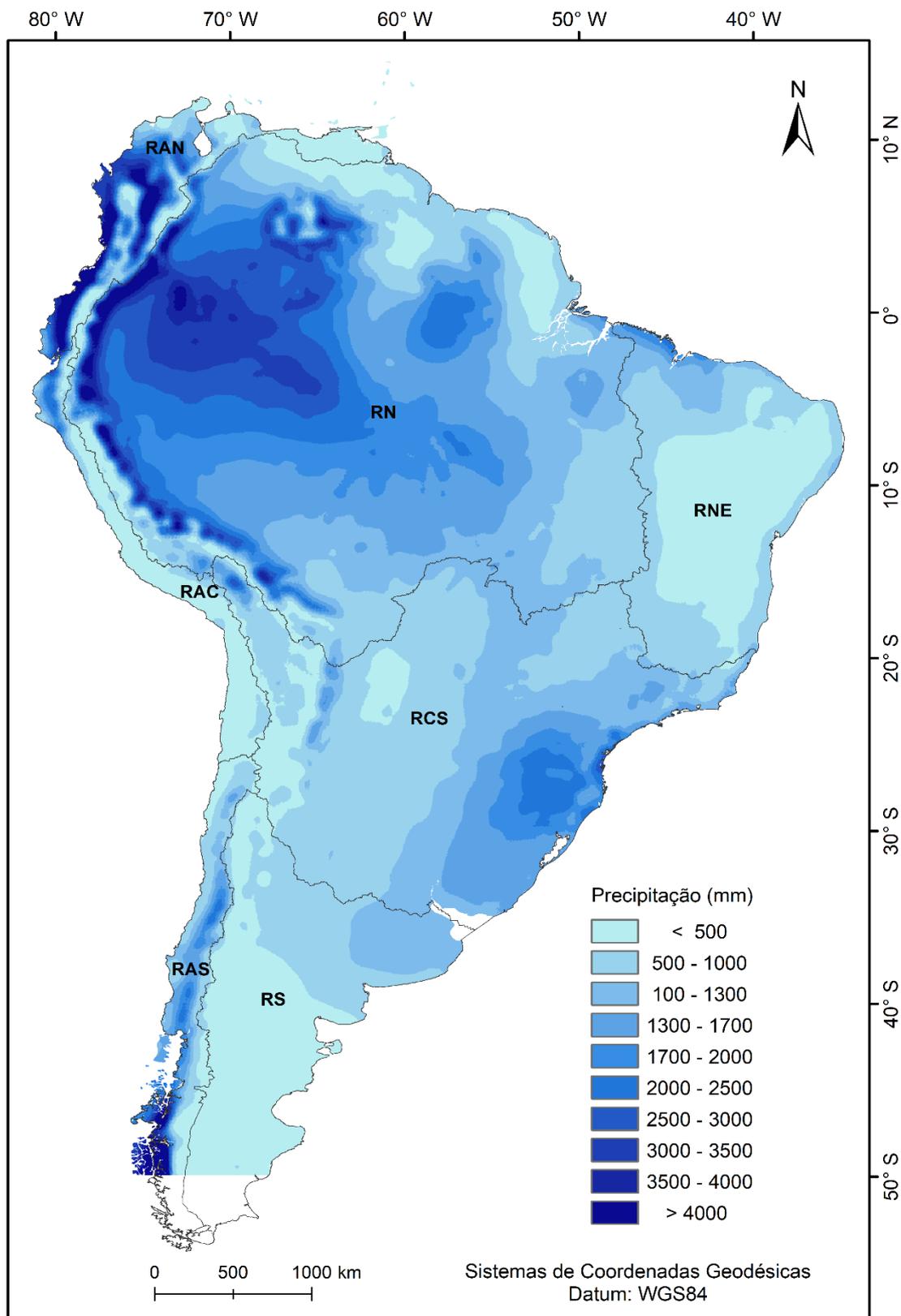
Apêndice Q- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-MIROC5.



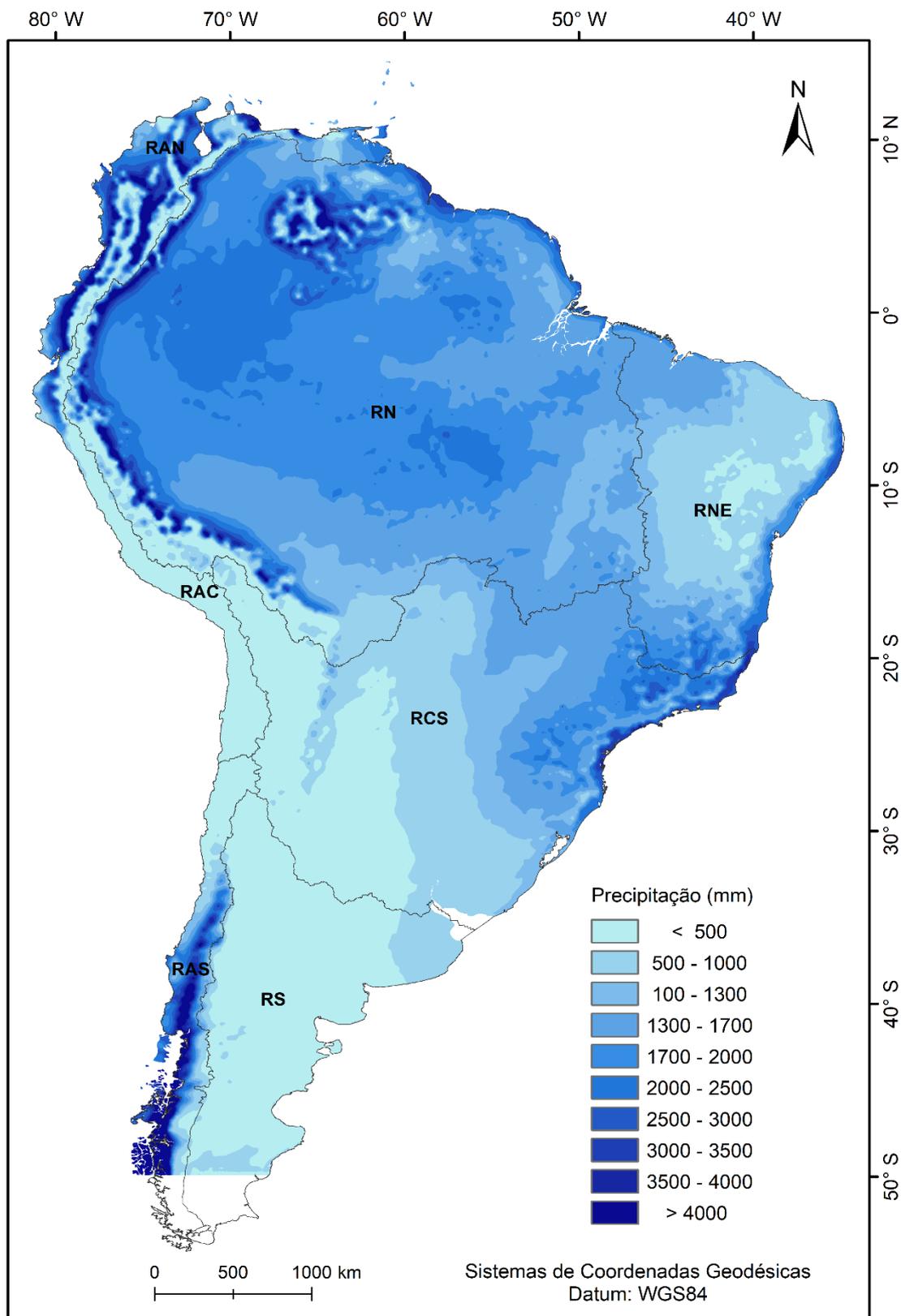
Apêndice R- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-CaNESM2.



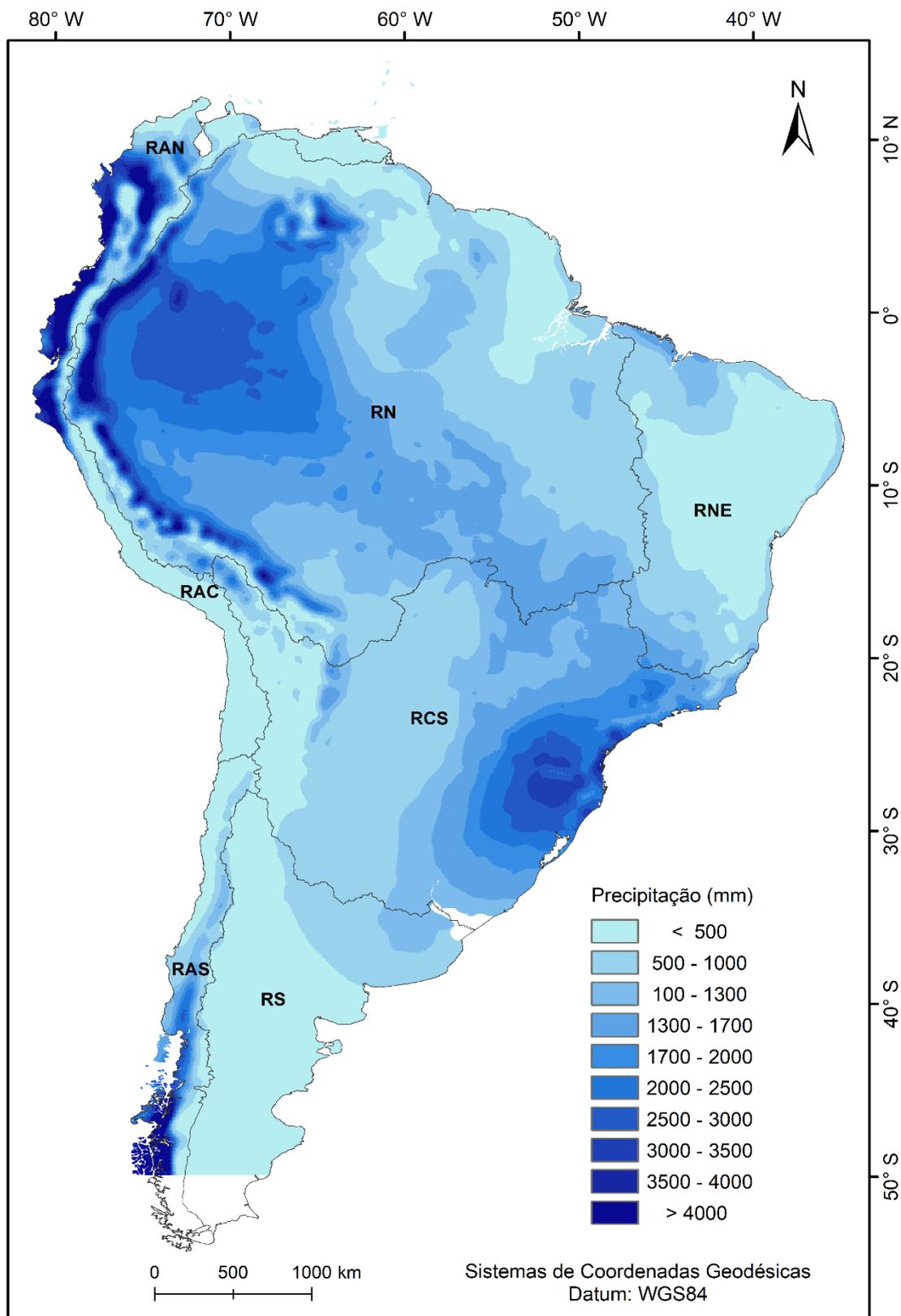
Apêndice S- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



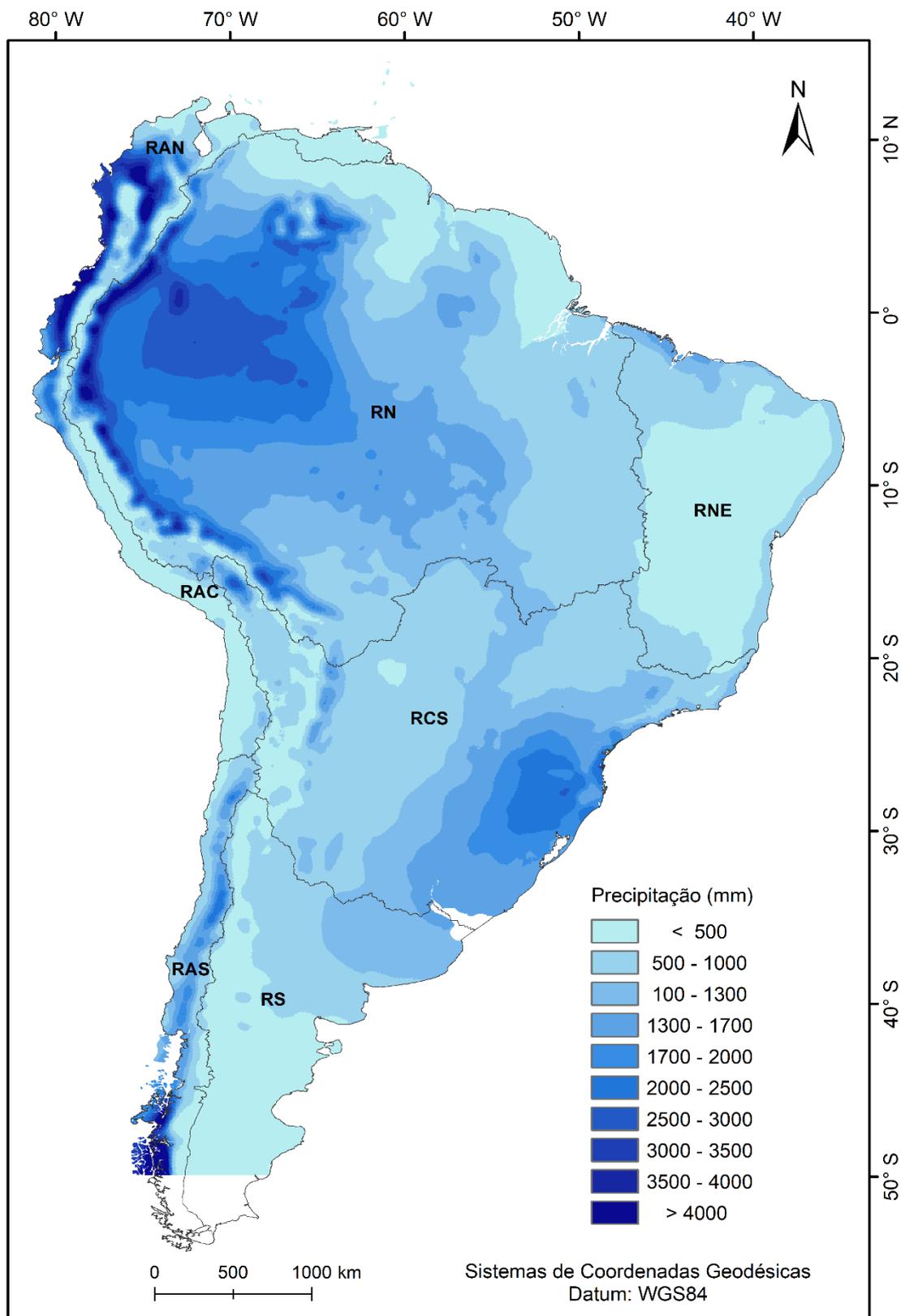
Apêndice T- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-MIROC5.



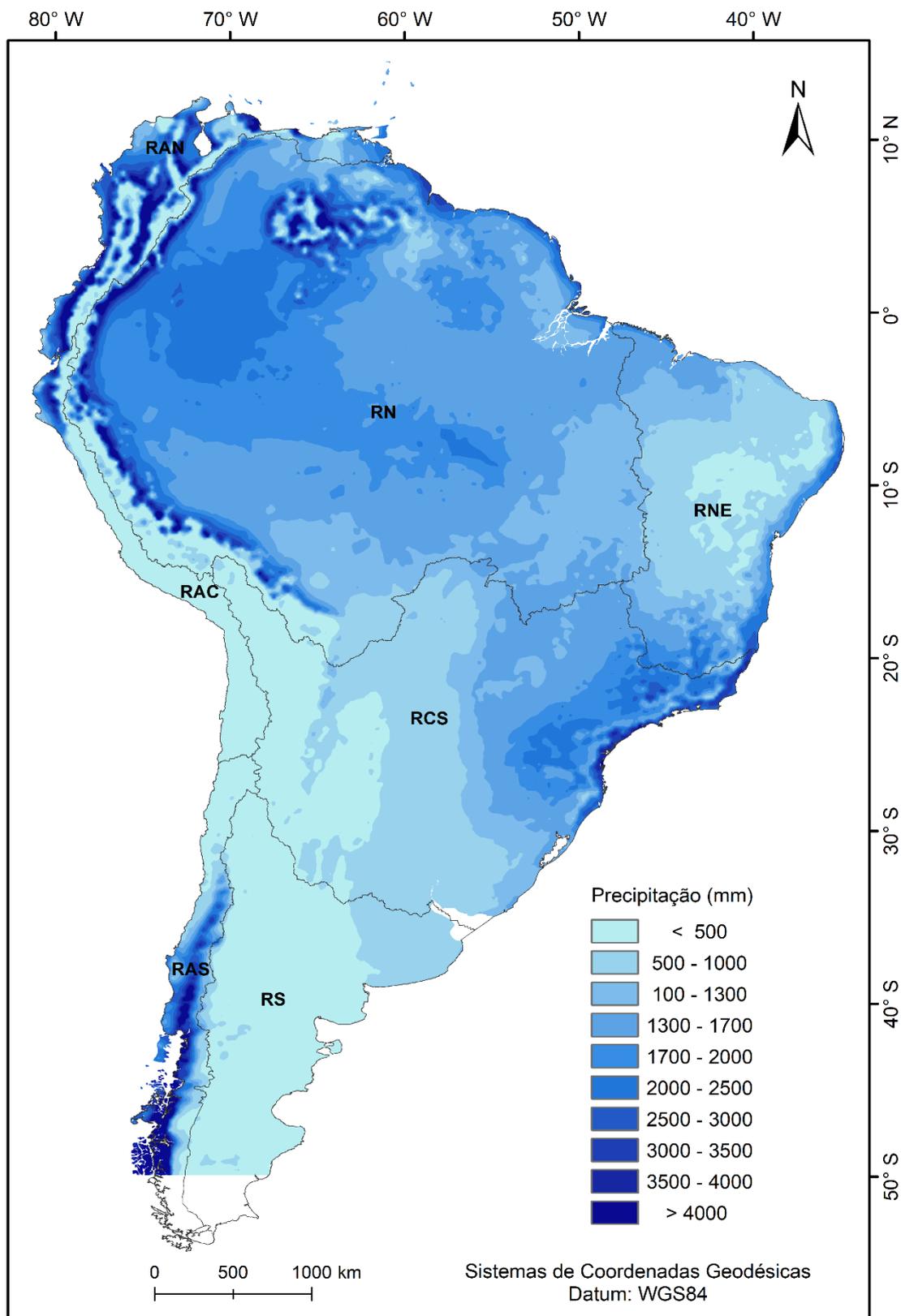
Apêndice U- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 Eta-CaNESM2.



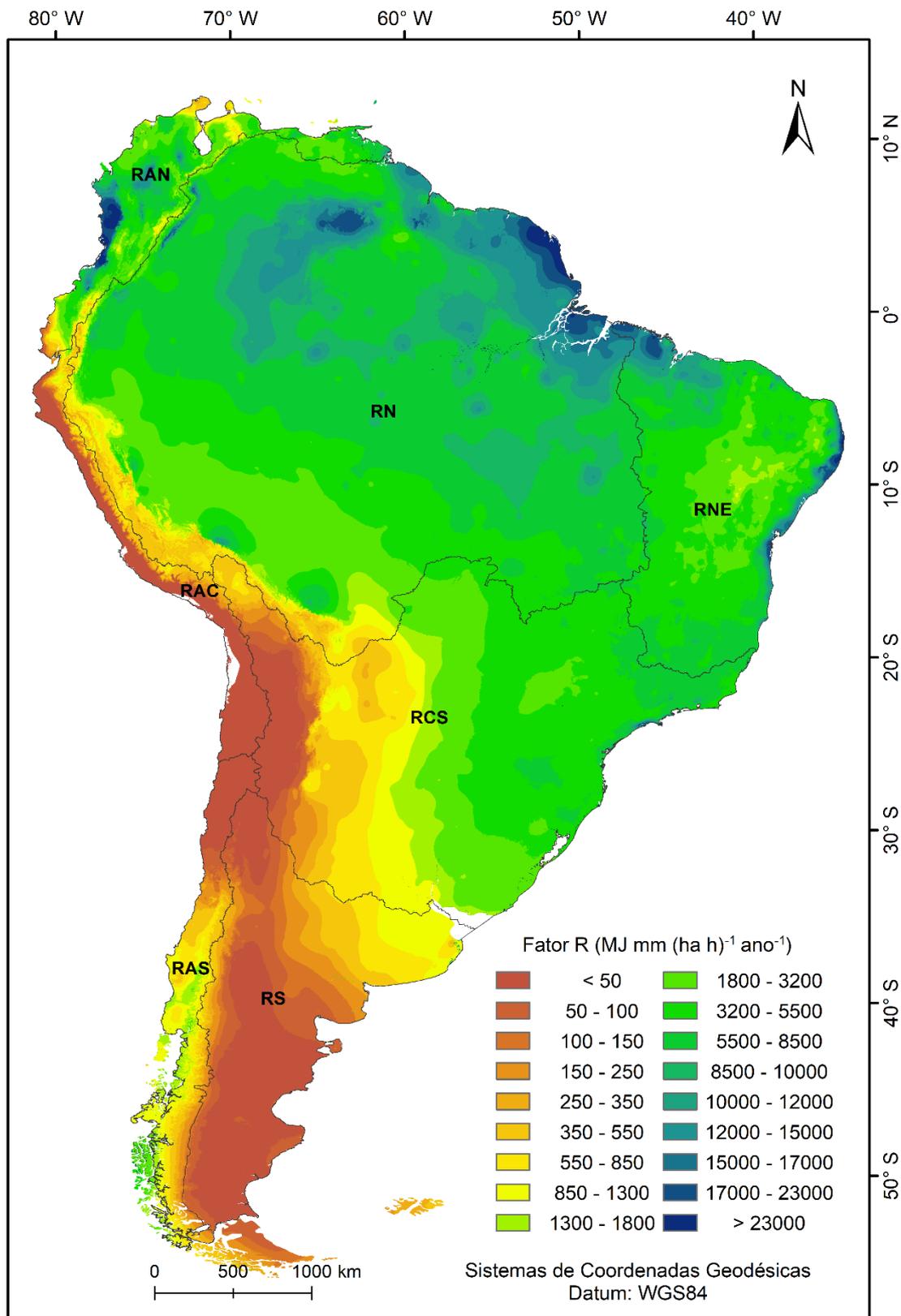
Apêndice V- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2098, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



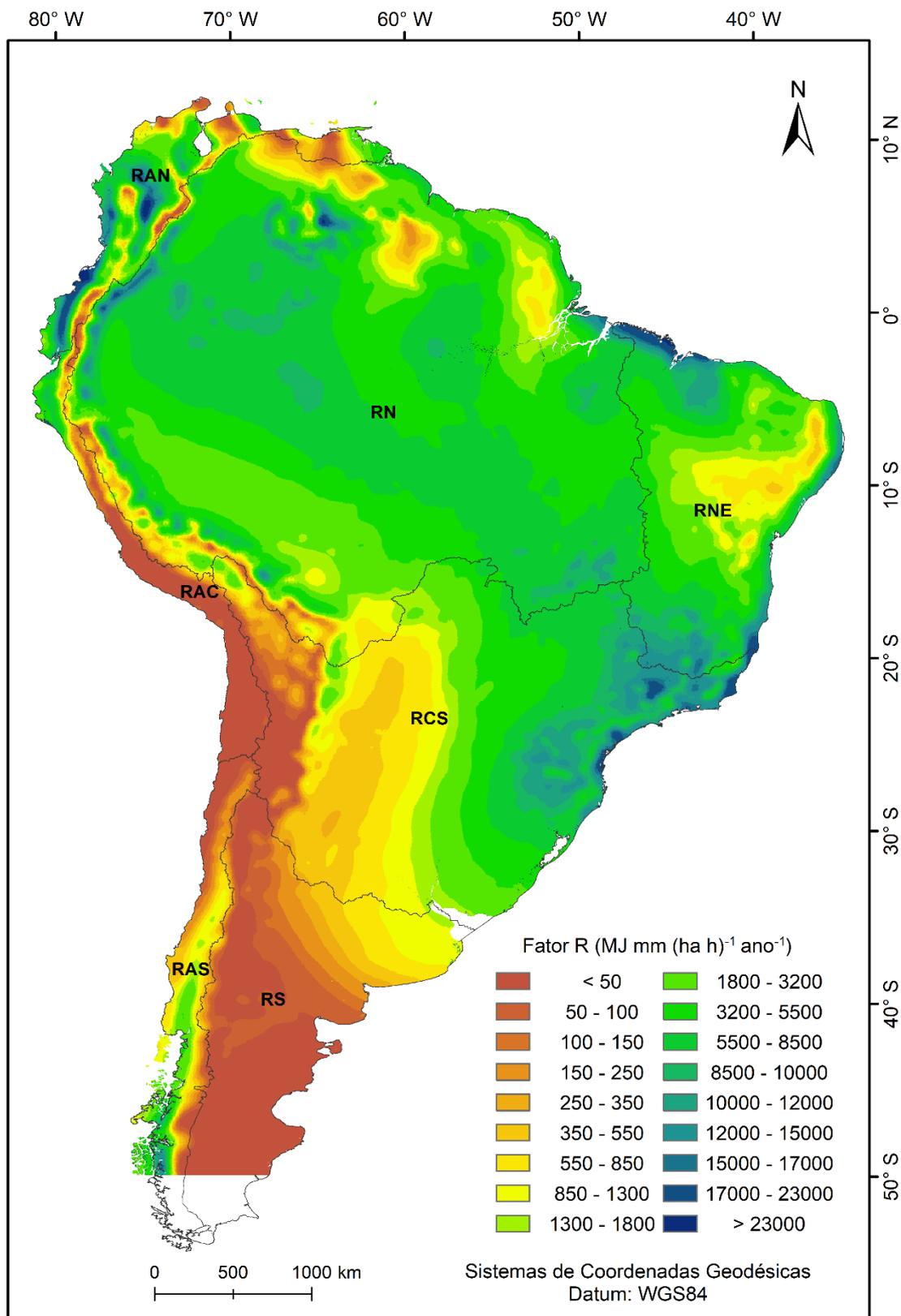
Apêndice W- Mapas de precipitação média anual para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 Eta-MIROC5.



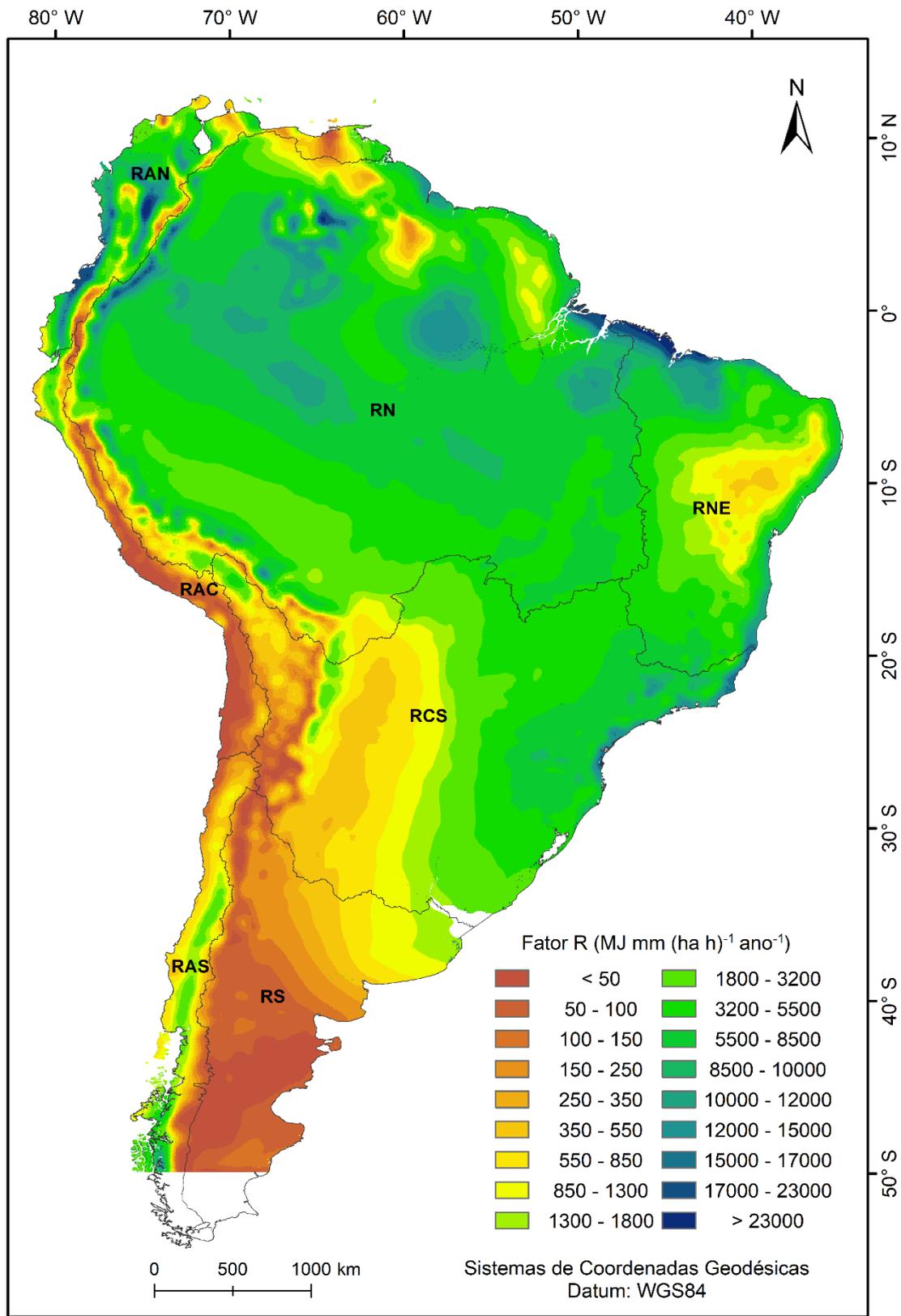
Apêndice X- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS com base nos dados médios precipitação oriundos da base de dados WorldClim.



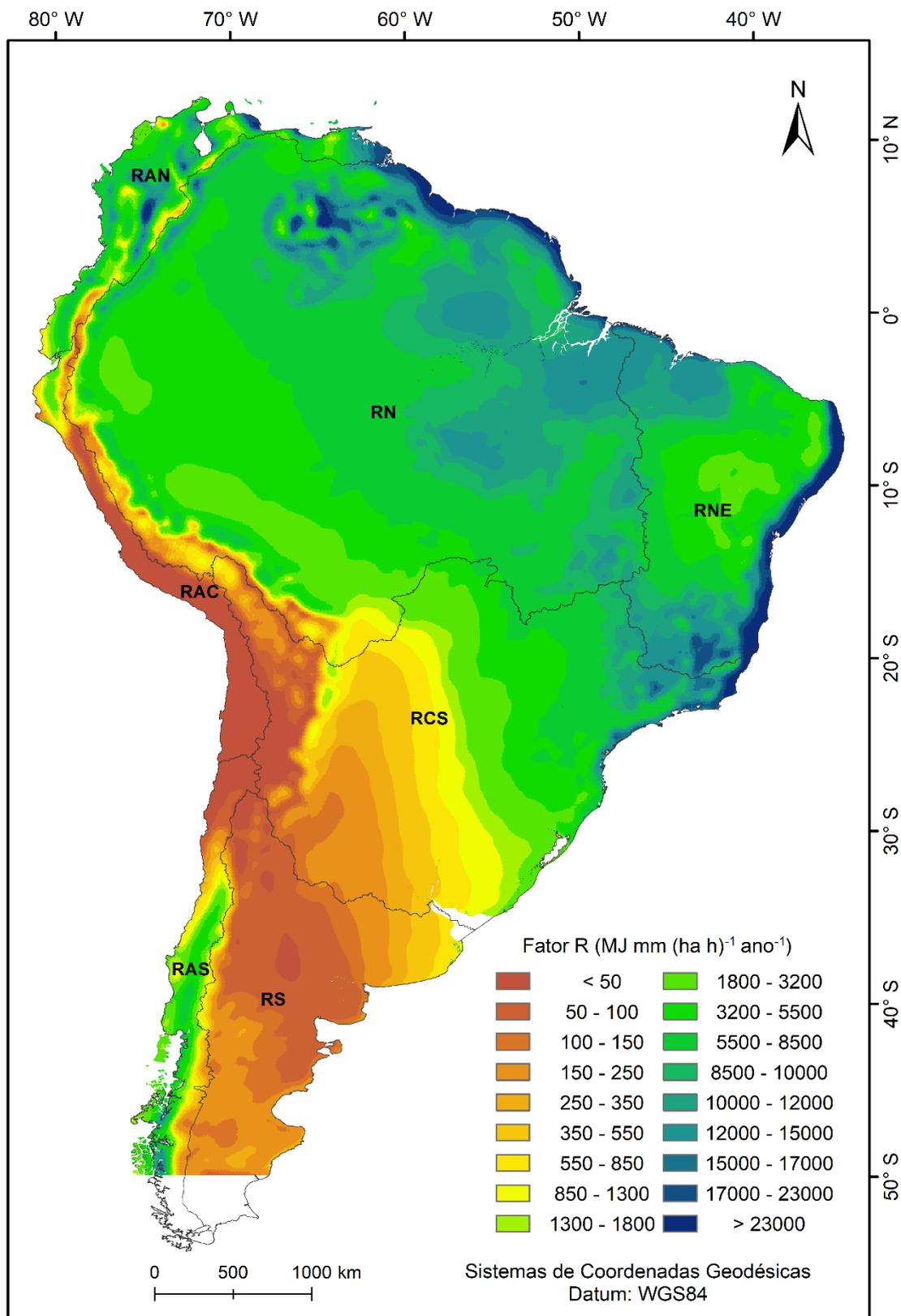
Apêndice Y- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS com base no modelo desenvolvido e dados do modelo Eta-CANESM2.



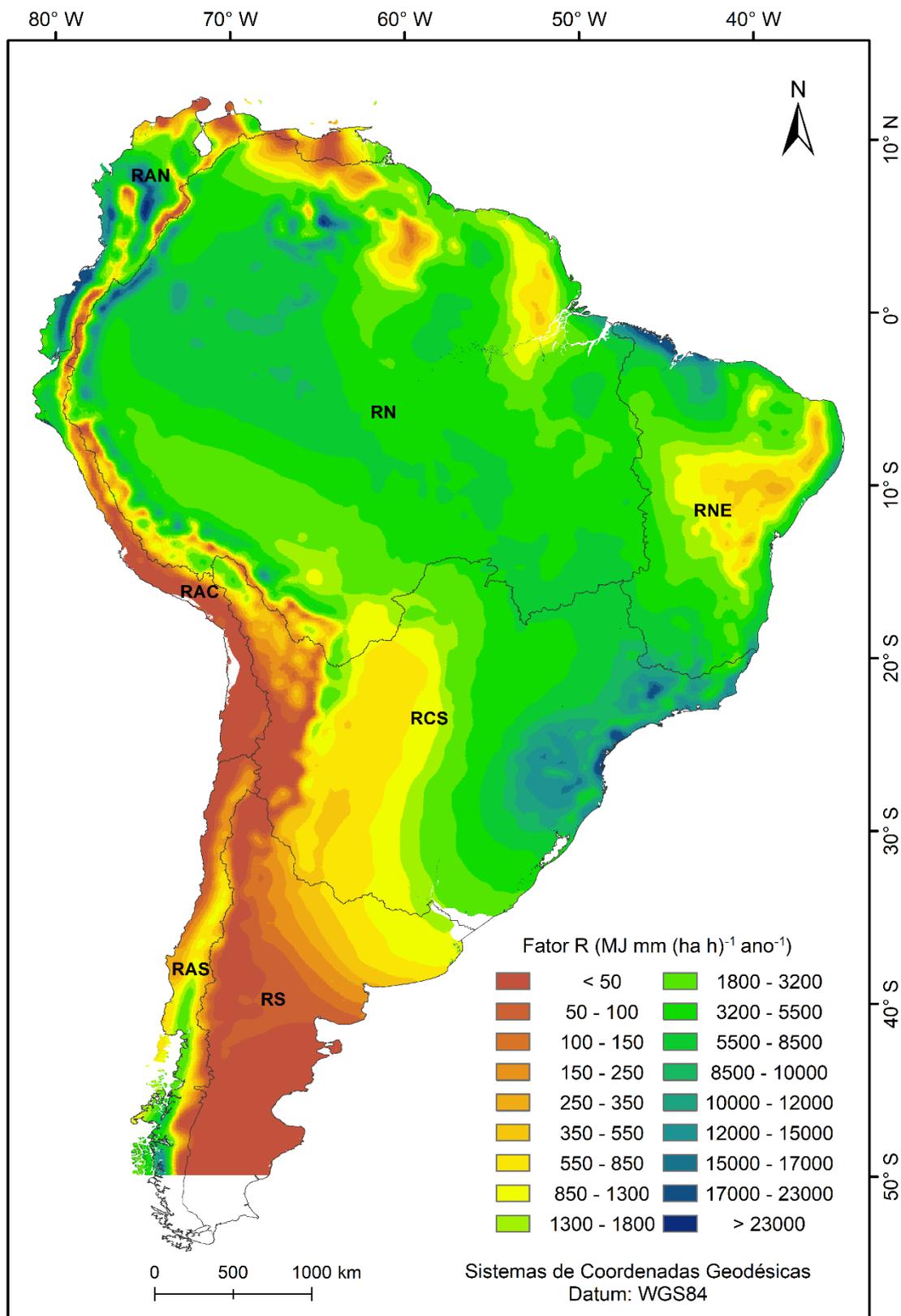
Apêndice Z- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS com base no modelo desenvolvido e dados do modelo Eta-HadGEM2-ES.



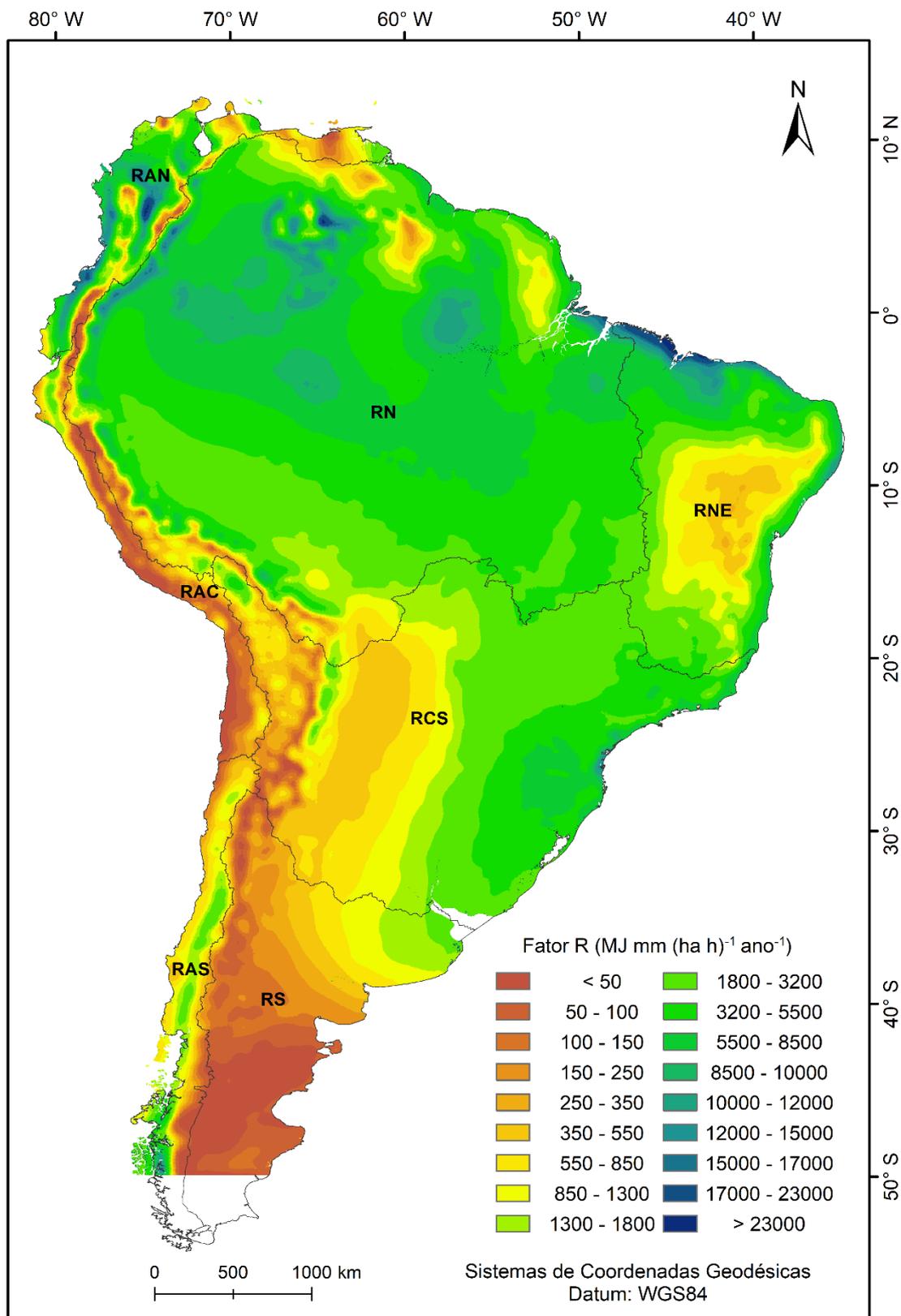
Apêndice AA- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS com base no modelo desenvolvido e dados do modelo Eta-MIROC5.



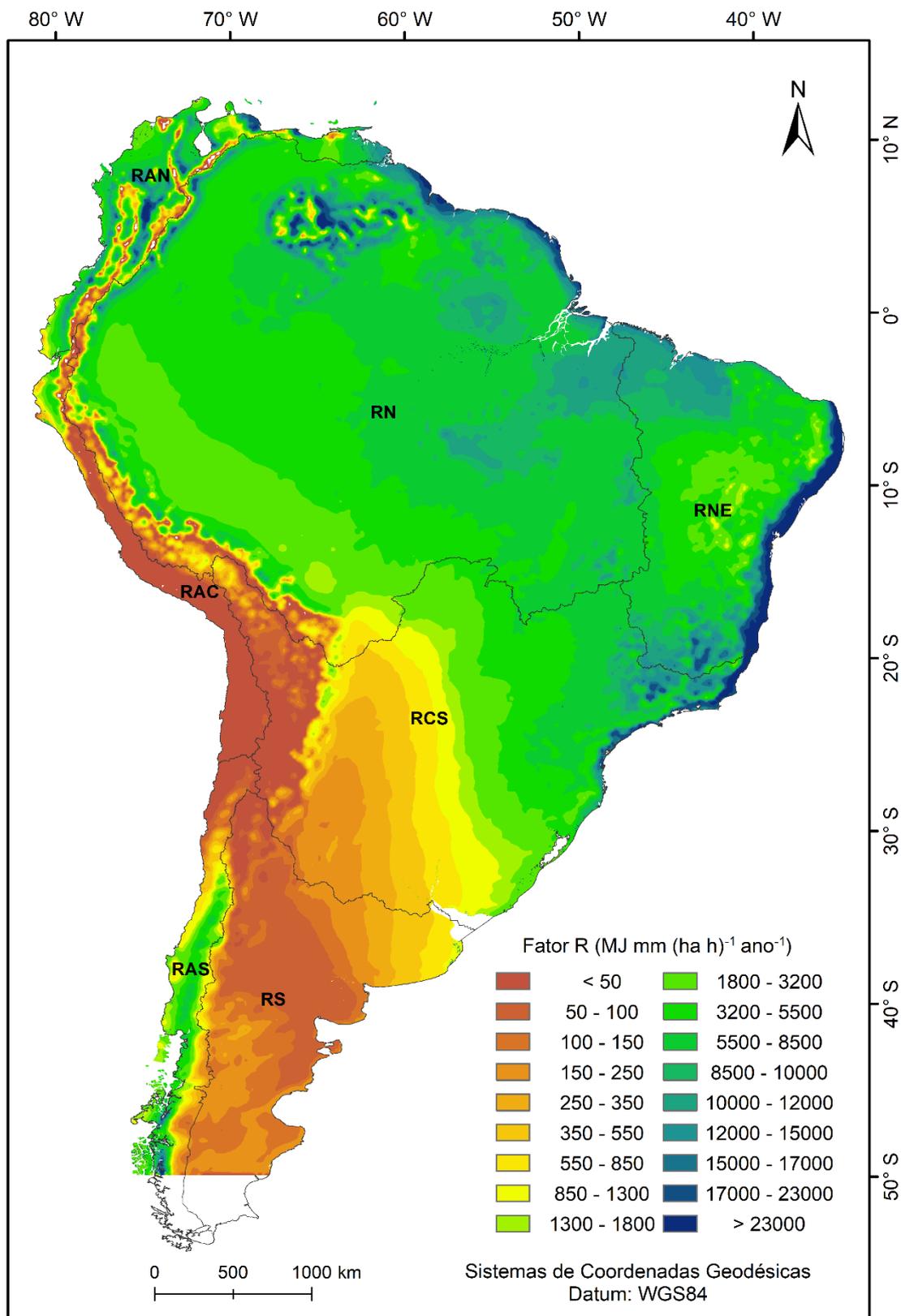
Apêndice AB- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-CaNESM2.



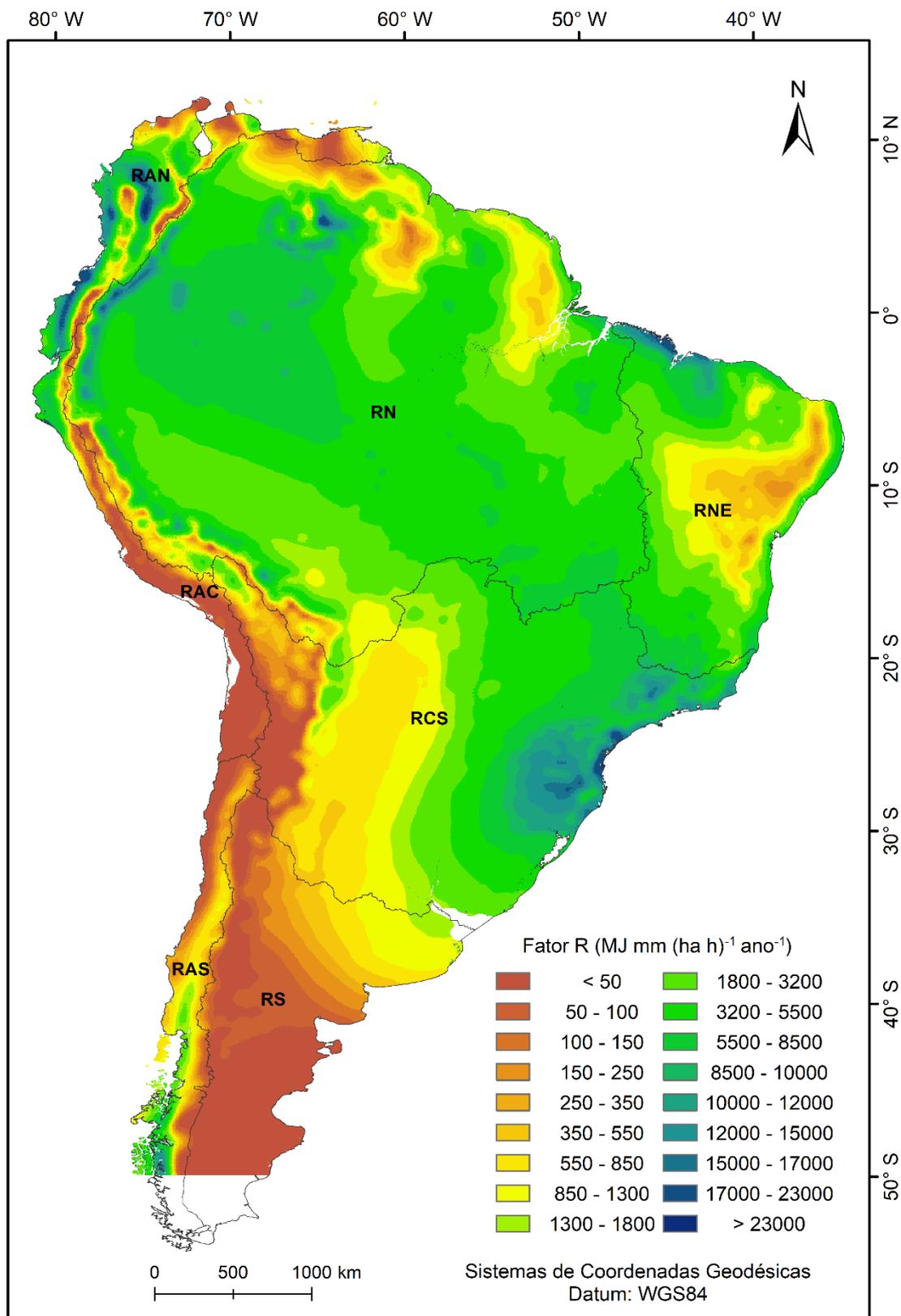
Apêndice AC- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



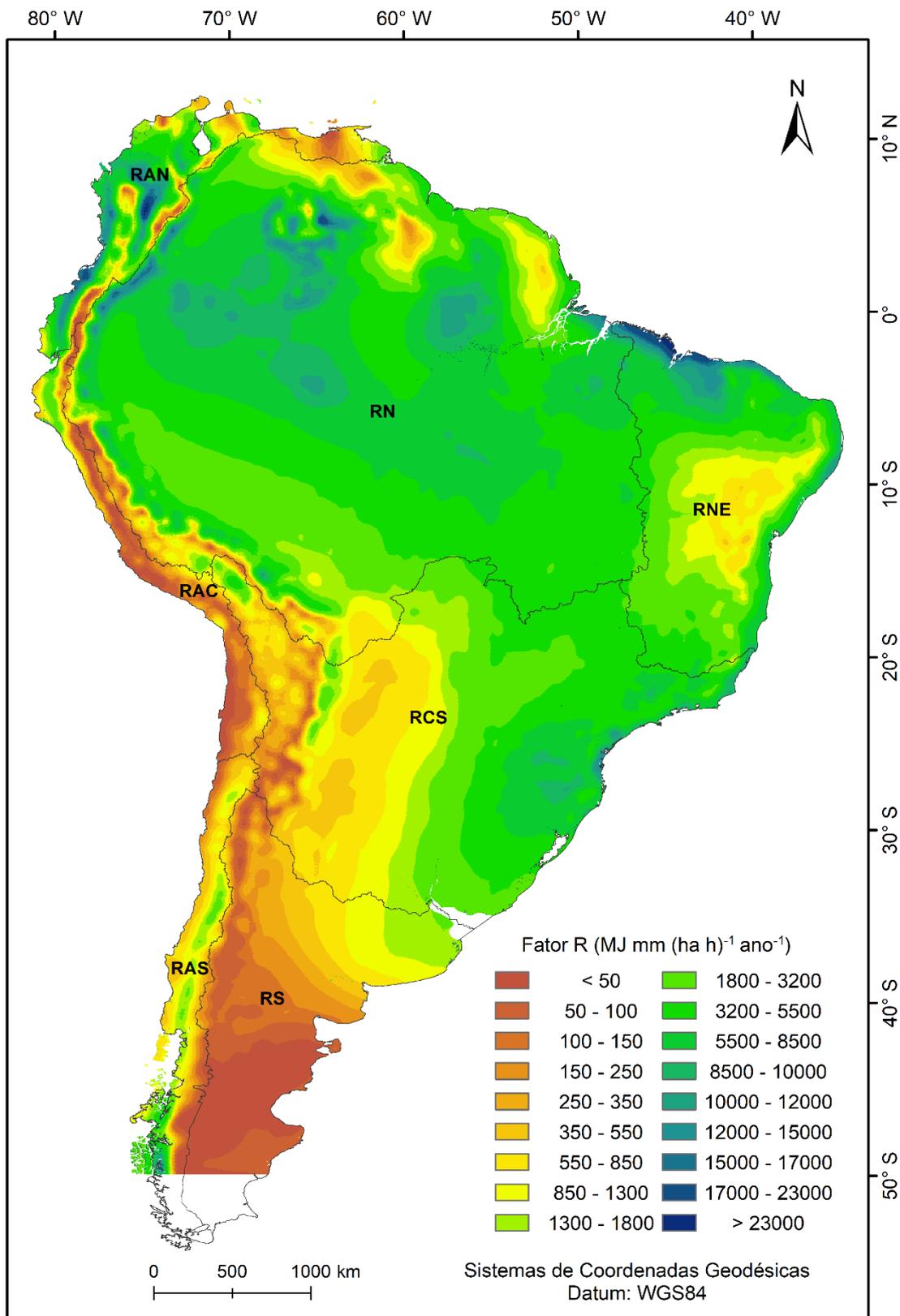
Apêndice AD- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



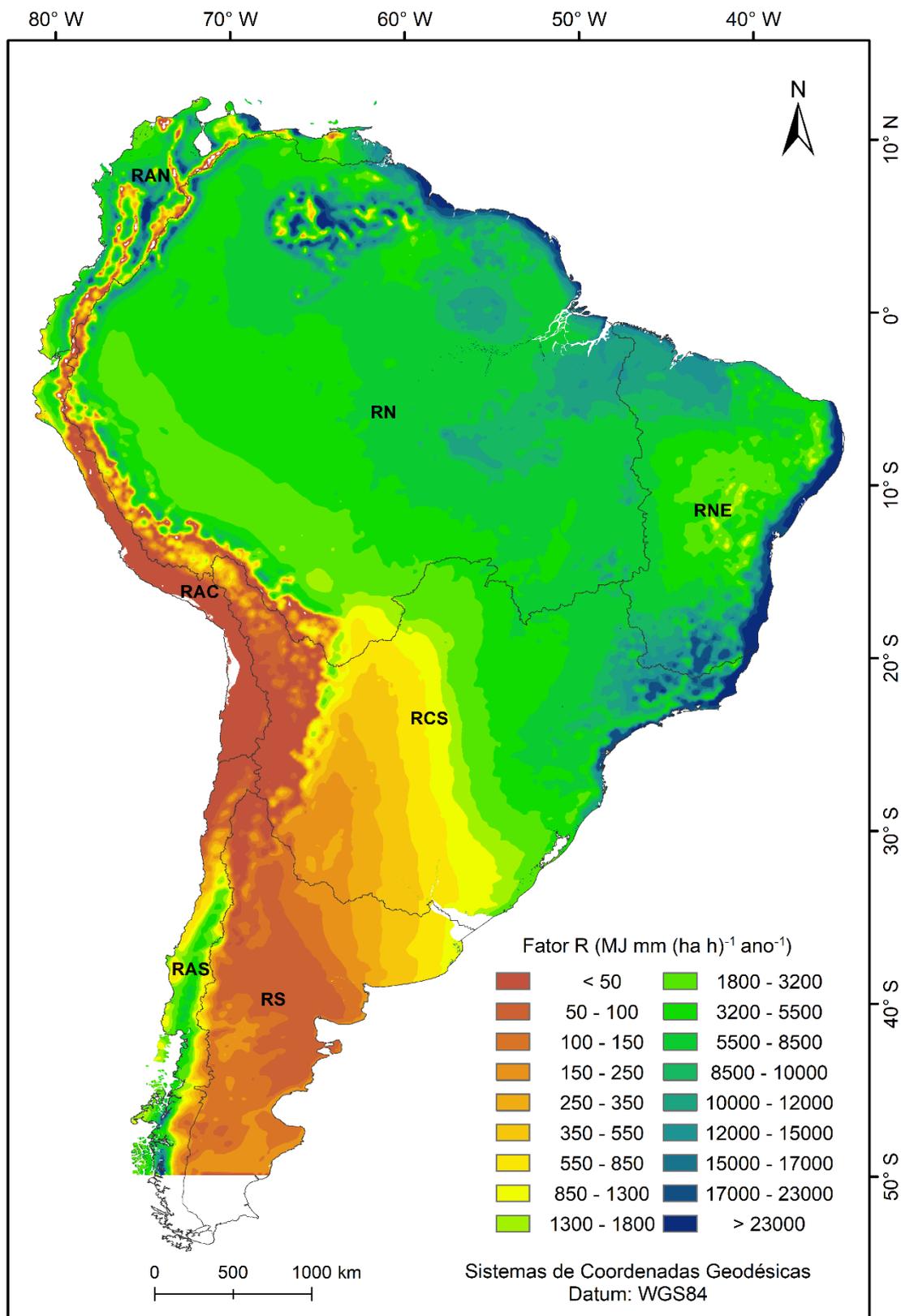
Apêndice AE- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-CaNESM2.



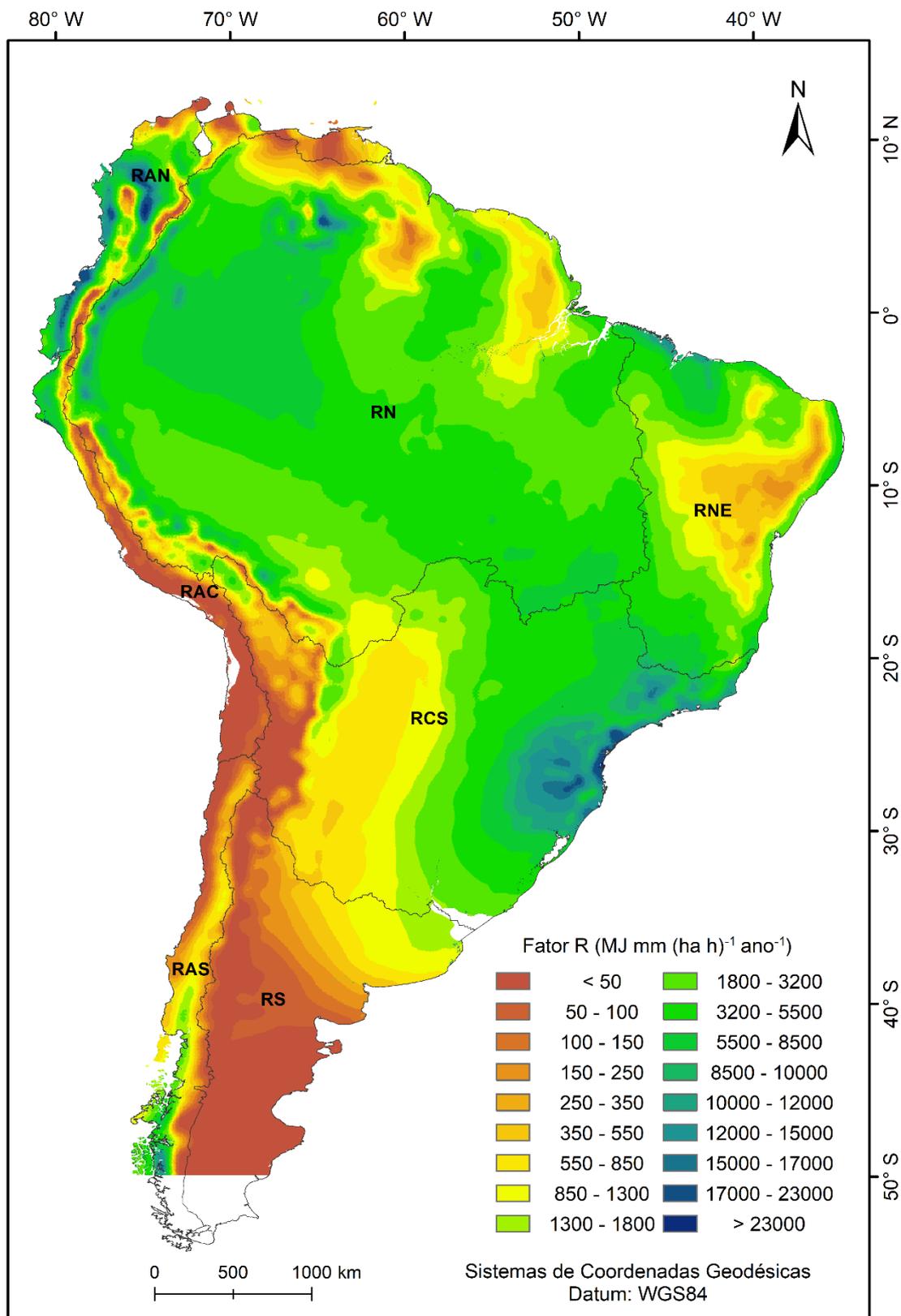
Apêndice AF- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



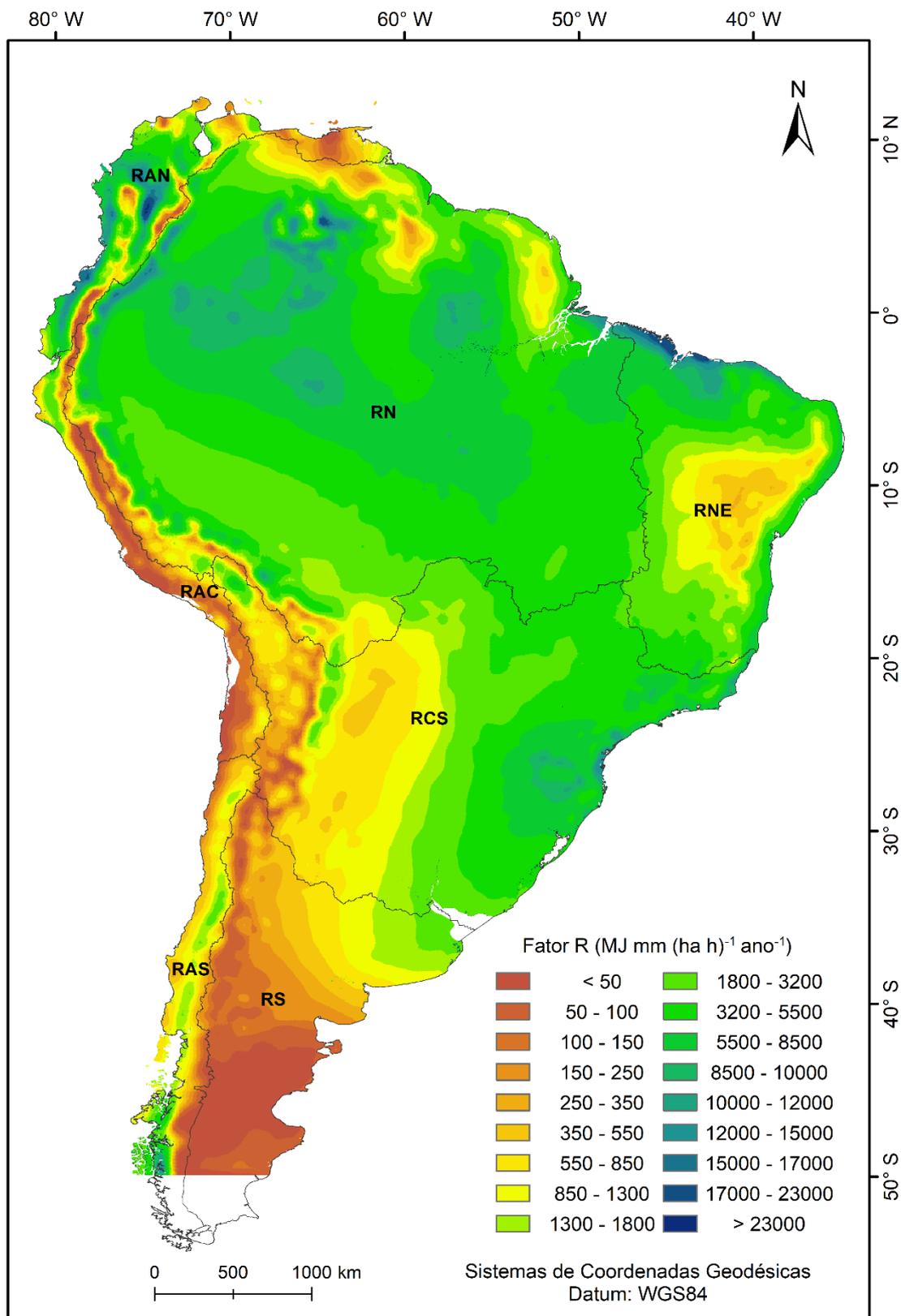
Apêndice AG- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



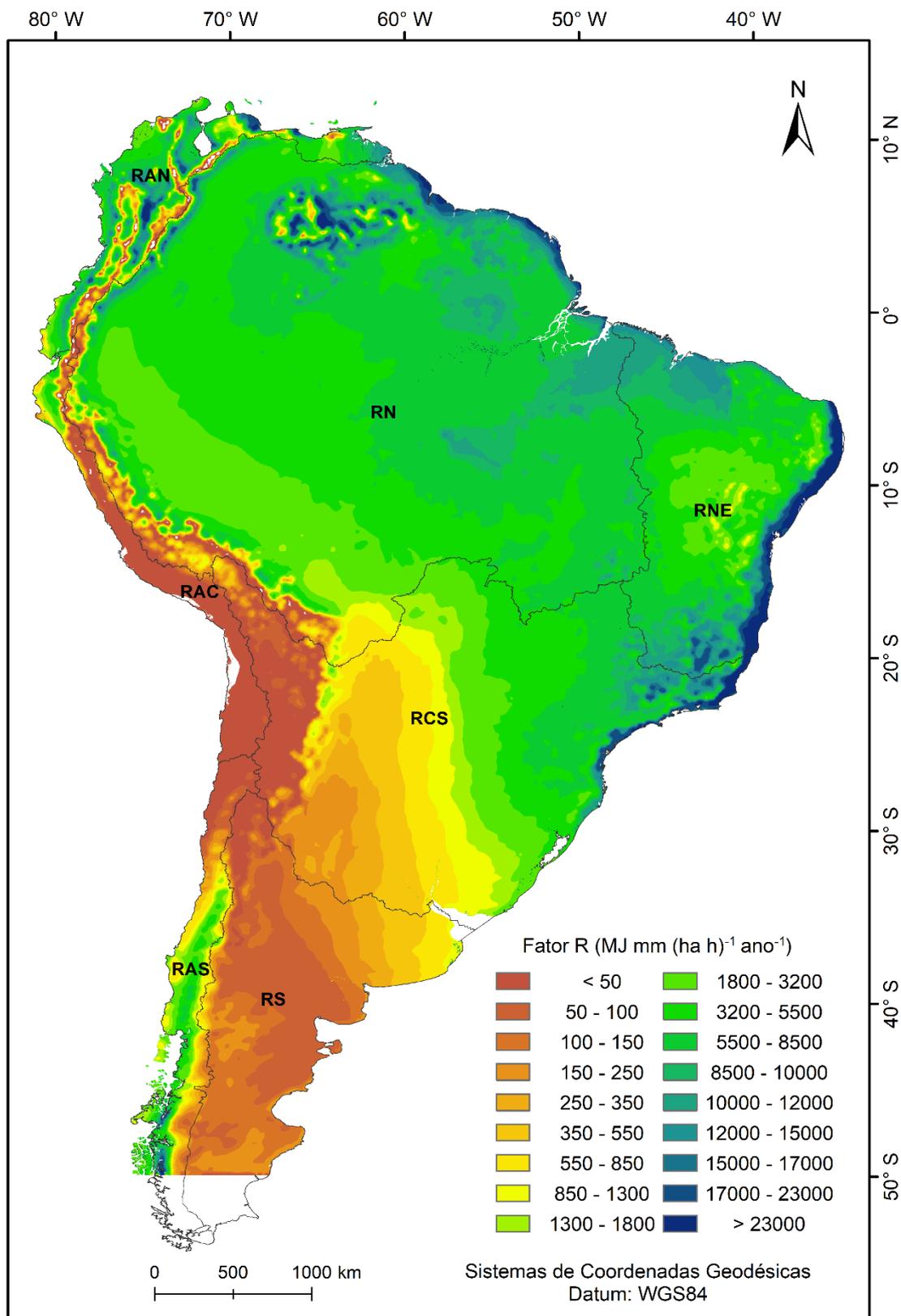
Apêndice AH- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 Eta-CANESM2.



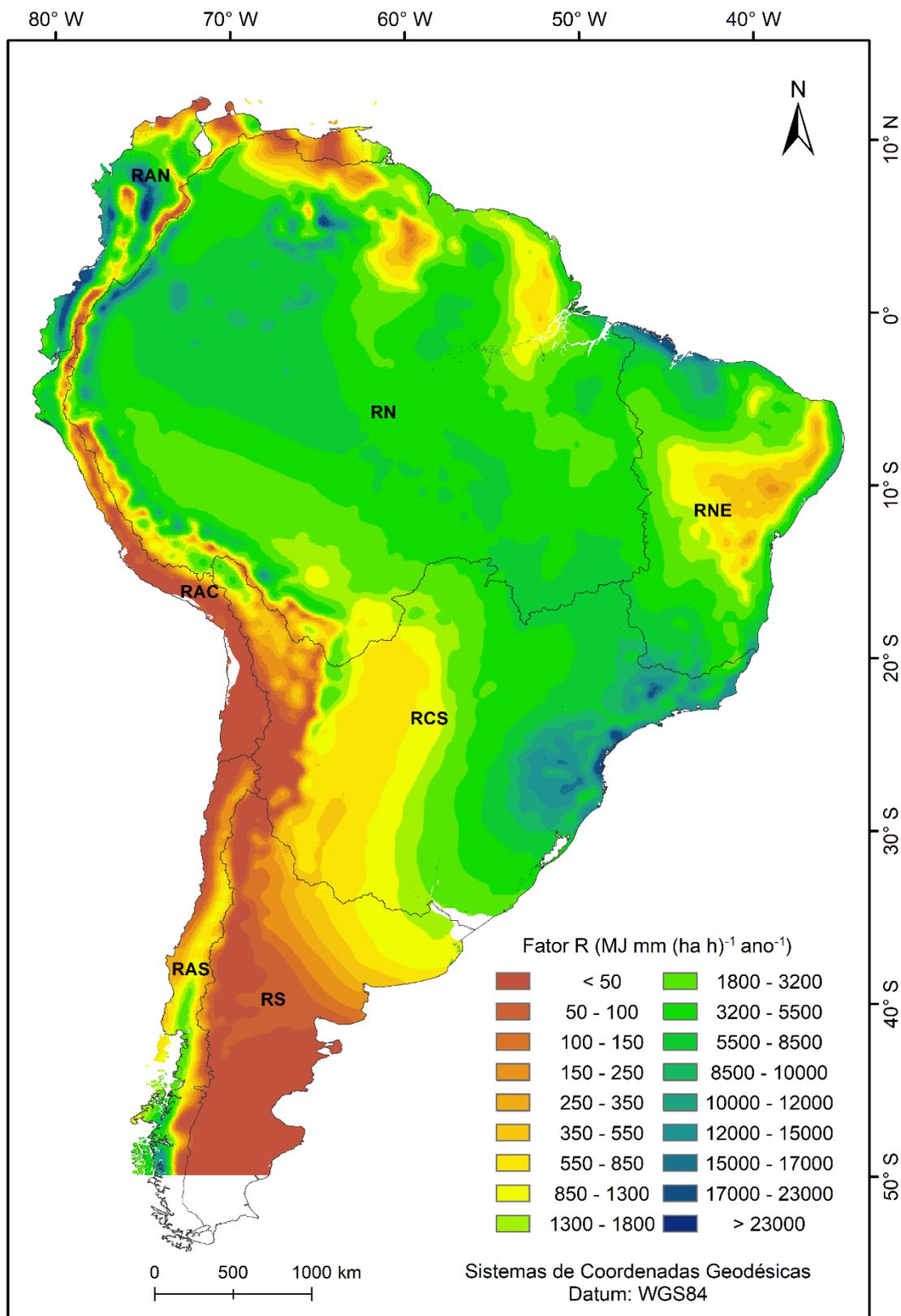
Apêndice AI- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2098, RCP 4.5 Eta-HadGEM2-ES.



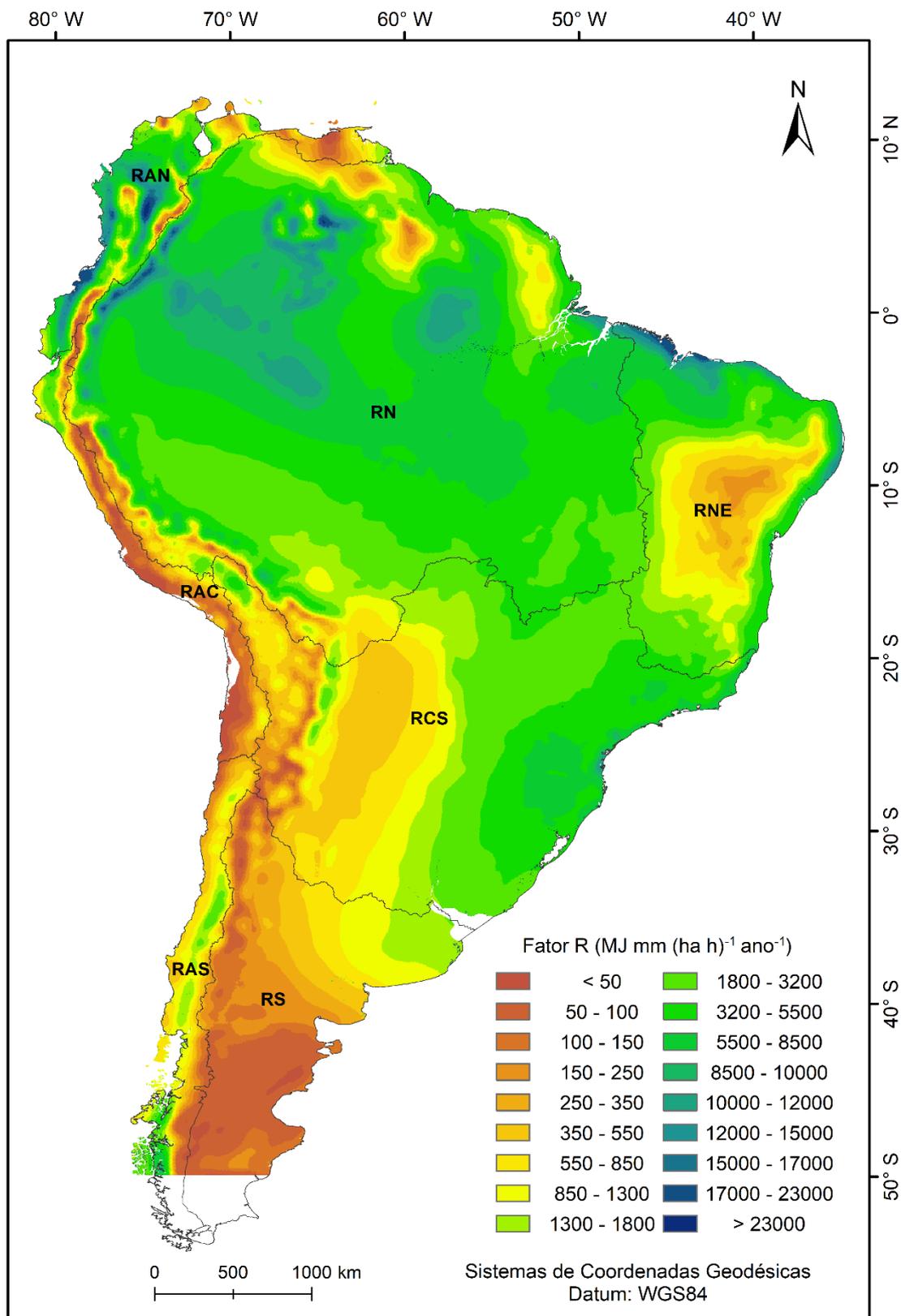
Apêndice AJ- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2099, RCP 4.5 Eta-MIROC5.



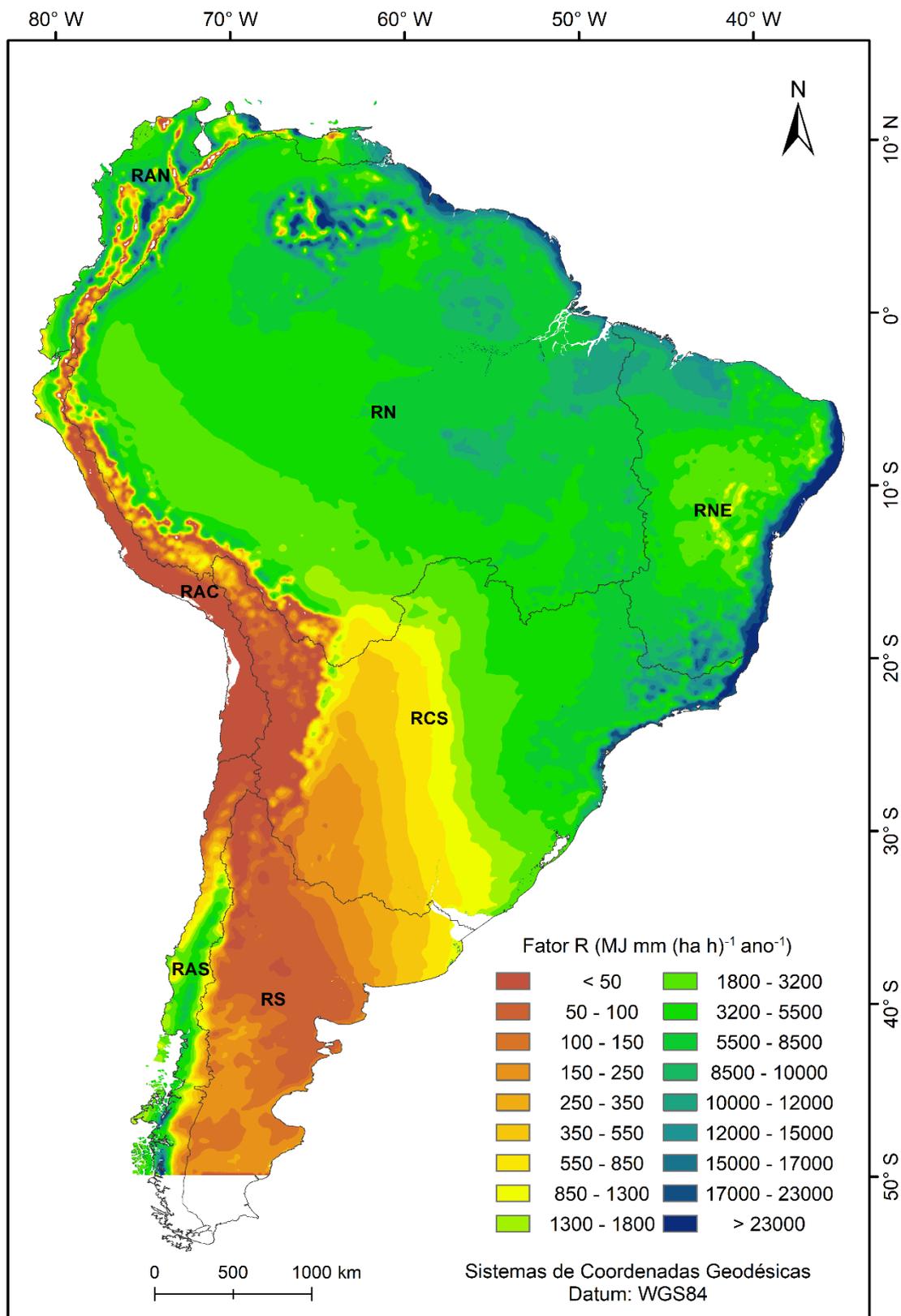
Apêndice AK- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-CaNESM2.



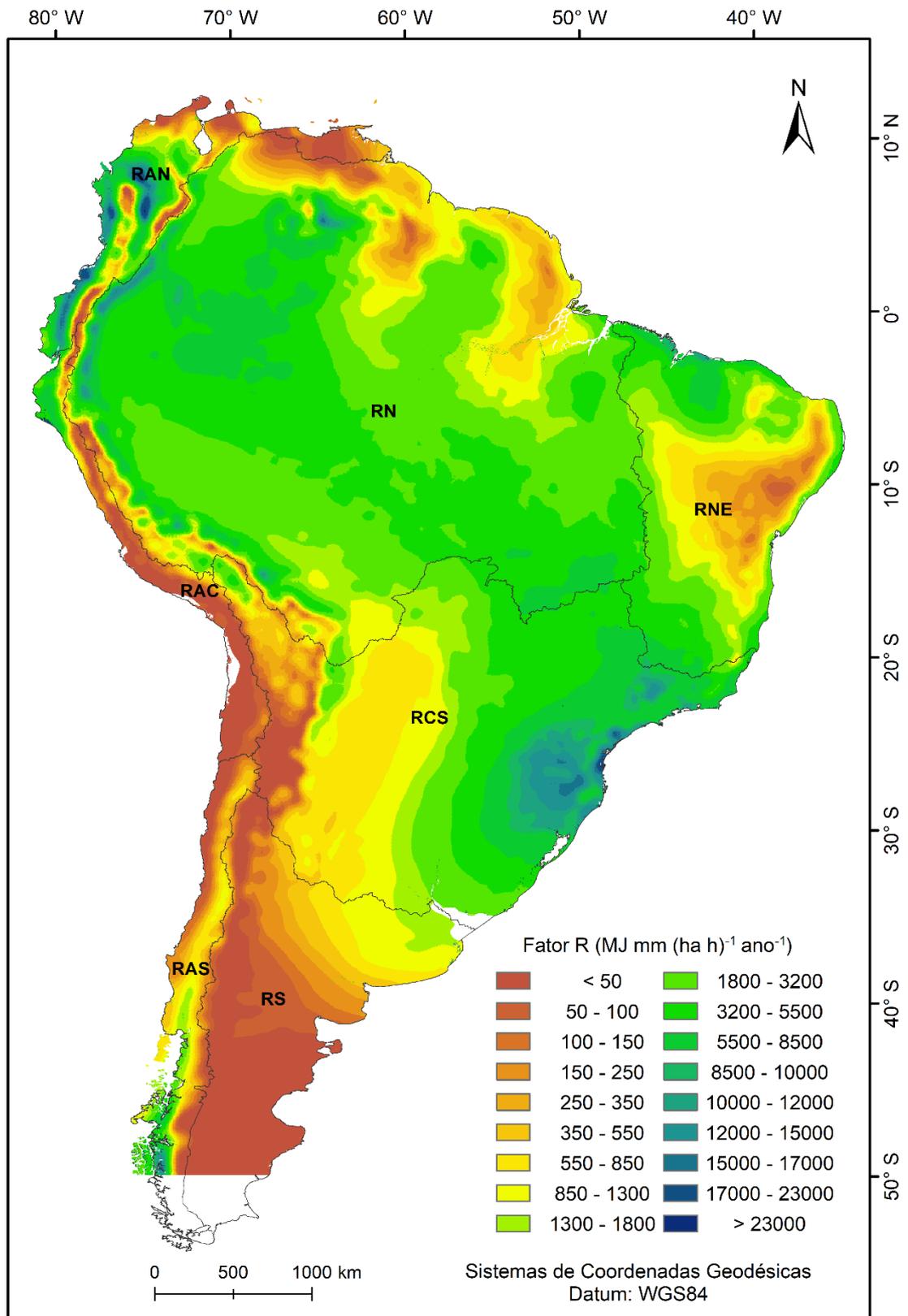
Apêndice AL- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



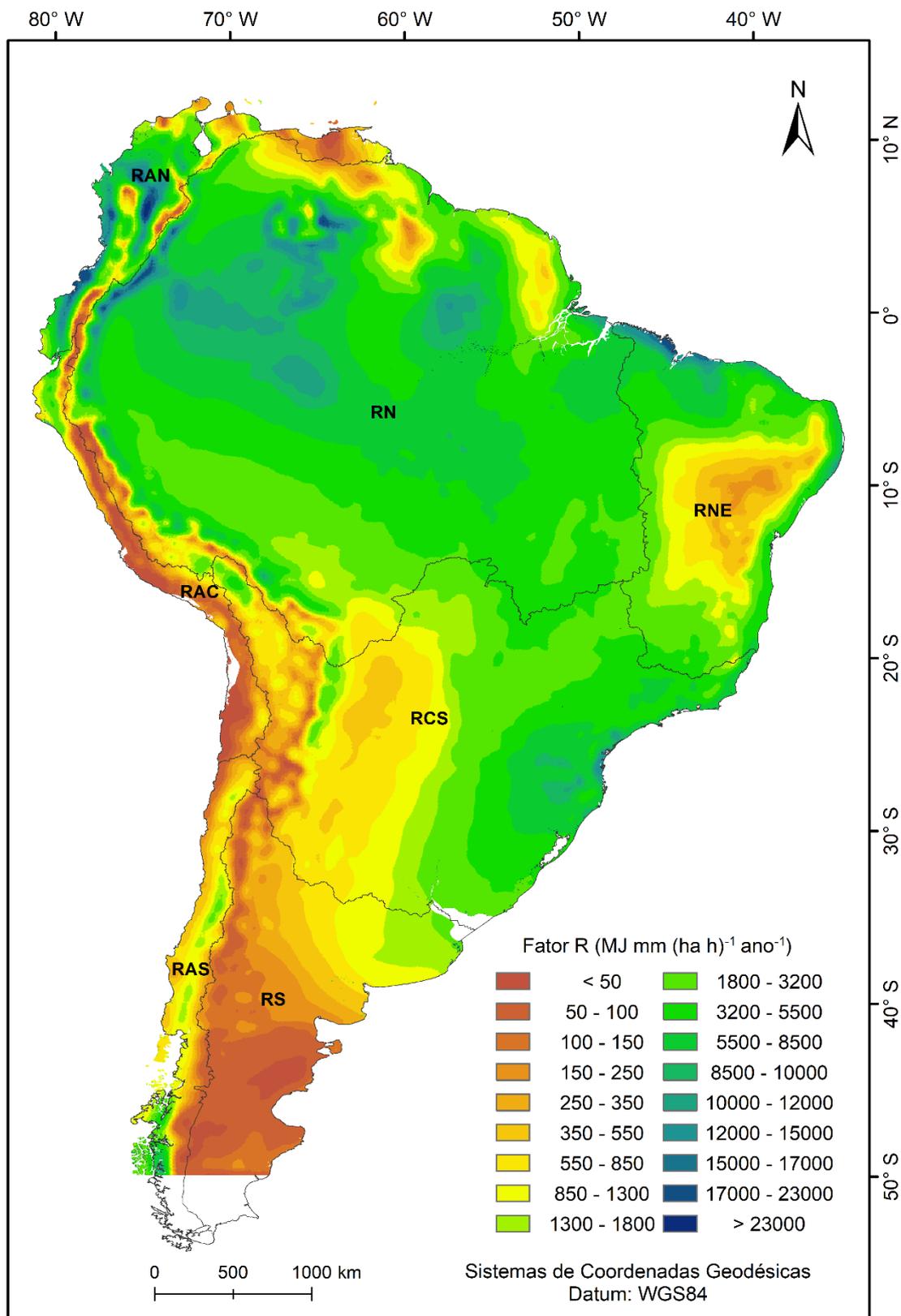
Apêndice AM- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2010-2040, RCP 8.5 Eta-MIROC5.



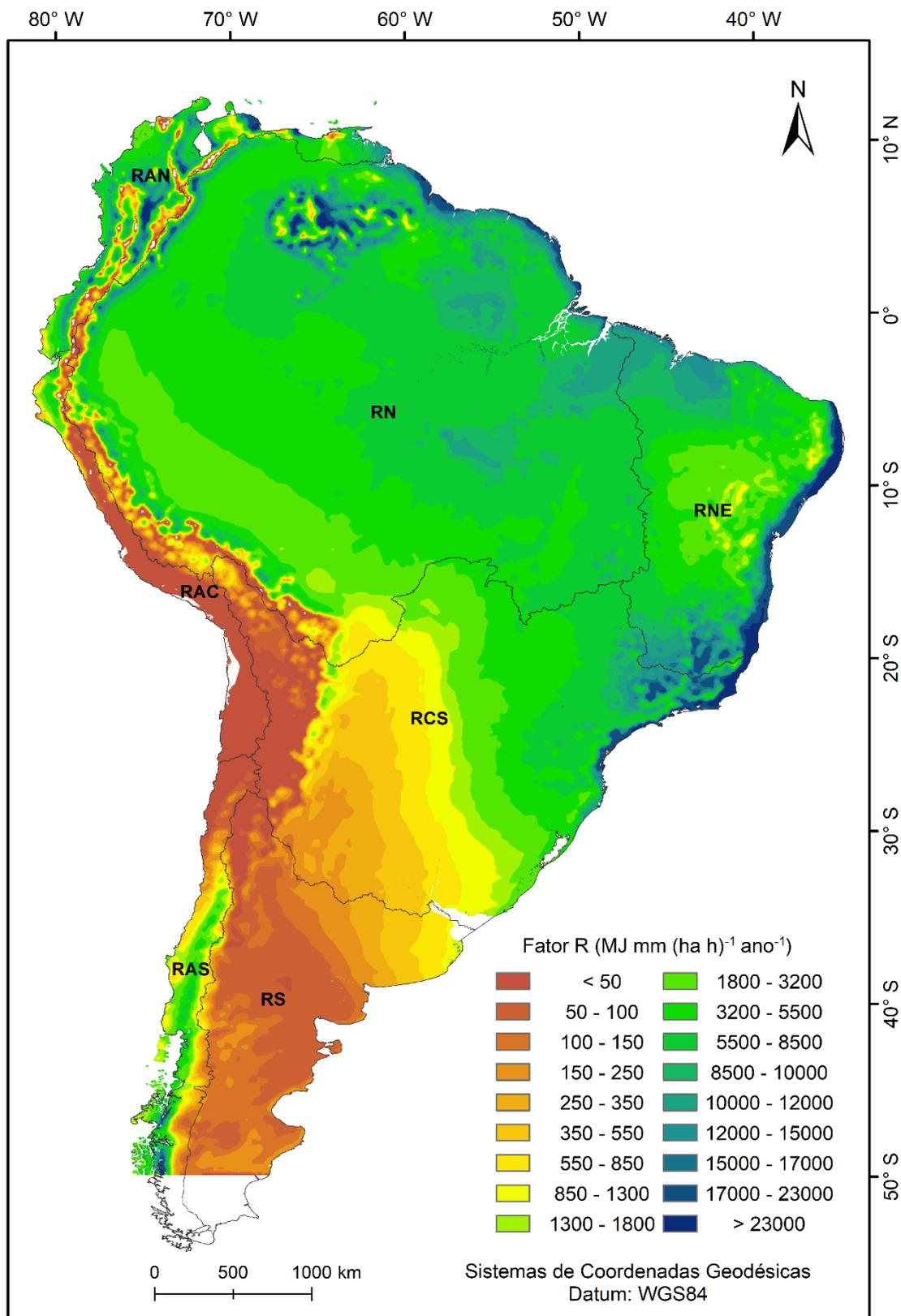
Apêndice AN- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-CaNESM2.



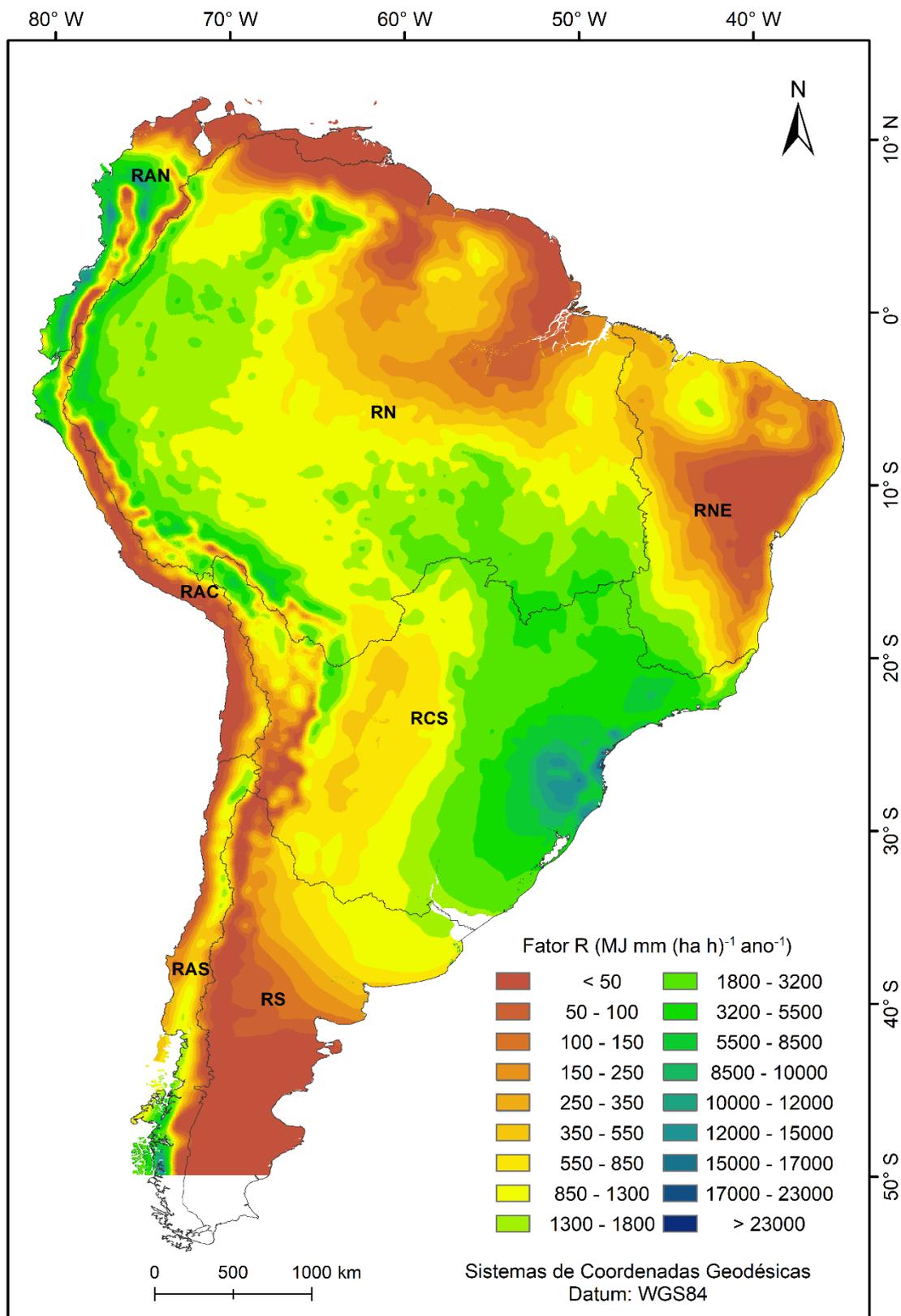
Apêndice AO- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



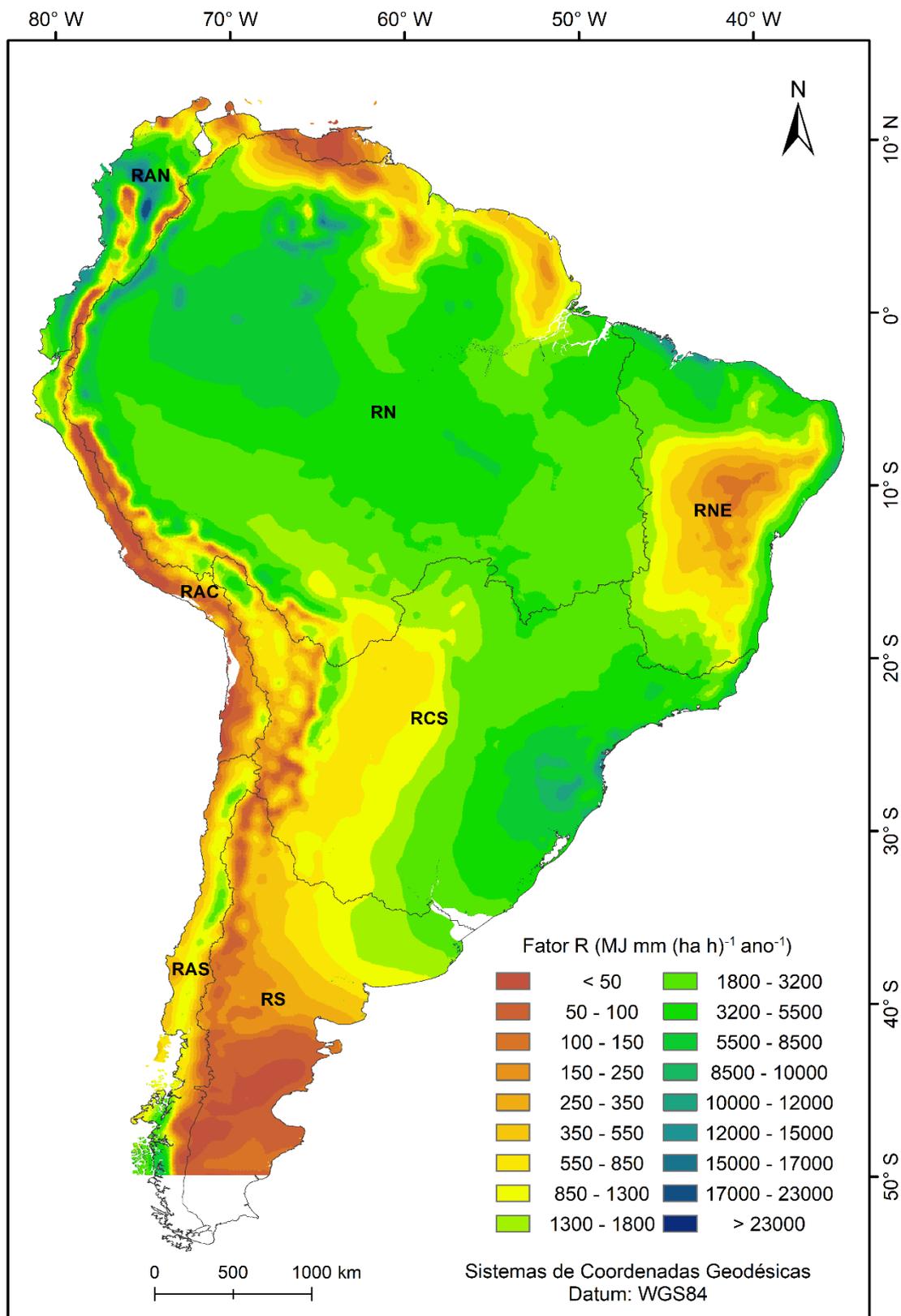
Apêndice AP- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para a AS para o período 2041-2070, RCP 8.5 Eta-MIROC5.



Apêndice AQ- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 Eta-CaNESM2.



Apêndice AR- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2098, RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES.



Apêndice AS- Mapa do fator R ($\text{MJ mm (ha h)}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para a AS para o período 2071-2099, RCP 8.5 Eta-MIROC5.

