



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

REPRESENTAÇÃO DA CLIMATOLOGIA E DOS EXTREMOS DE TEMPERATURA DO AR E PRECIPITAÇÃO NO BRASIL PELA REANÁLISE ERA5

RICARDO HENRIQUE DOS SANTOS SOUZA

ORIENTADORA: Prof^ª. Dr^ª Claudine Pereira Dereczynski

COORDINADOR: Dr. Wanderson Luiz Silva

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ
Janeiro, 2020

RICARDO HENRIQUE DOS SANTOS SOUZA

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da UFRJ como requisito necessário à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:

Claudine Pereira Dereczynski, D.Sc.
Orientadora

Wanderson Luiz Silva, D.Sc.
Coorientador

Edilson Marton, D.Sc.

Hugo Abi Karam, D.Sc.

Pedro Regoto de Souza, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ
Janeiro, 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por minha vida, pelas oportunidades, pelos momentos felizes e difíceis que me fazem evoluir.

À toda a minha família, que sempre foi um porto seguro. Especialmente aos meus pais, que me criaram com muito amor e carinho e me ensinaram a ser muito do que eu sou hoje. Aos meus irmãos, que sempre estiveram ao meu lado sendo bons companheiros e amigos para todas as horas. Aos meus avós, tios, primos e sobrinhos que sempre tiveram carinho e apreço por mim.

À minha orientadora Claudine, por ter sido uma grande mãe acadêmica durante minha graduação, me ensinando e dando conselhos durante essa jornada e assim me ajudando evoluir como aluno e cientista.

Aos professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ por contribuírem para minha formação.

Ao Pedro Regoto e Wanderson por me ajudarem e tornarem possível a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos que fiz na graduação que tornaram esses anos agradáveis e aos meus amigos fora da graduação que sempre acreditaram em mim e torceram para meu sucesso.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da reanálise ERA5 na representação da climatologia de temperatura do ar e precipitação e das tendências em extremos climáticos no Brasil no período de 1981 a 2018. A climatologia e as tendências da reanálise ERA5 são verificadas junto às informações provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA). Ao todo, 15 indicadores de extremos climáticos associados à precipitação e à temperatura do ar foram calculados através do software FClimDex. Os resultados mostram que a reanálise ERA5 representa bem os padrões espaciais e temporais climatológicos de precipitação e de temperatura do ar no Brasil. Contudo, há subestimativas e superestimativas pontuais da precipitação e da temperatura mínima e uma subestimativa generalizada da temperatura máxima sobre o país. Em relação às tendências em extremos climáticos, a reanálise ERA5, de uma maneira geral, está de acordo com os dados observacionais e aponta para uma redução da precipitação na porção centro-norte do Brasil, além de sinais heterogêneos na Amazônia. Contudo, para a Região Sul, a reanálise apresenta ausência de sinais ou tendência de redução dos extremos de precipitação, enquanto os dados observados indicam o oposto. Para a temperatura, a reanálise ERA5, quando comparada aos dados observacionais, representa bem a tendência de aquecimento na maior parte do país, com redução de noites e dias frios e aumento de dias e noites quentes. Dessa maneira, a reanálise ERA5 mostrou-se uma boa ferramenta na caracterização climatológica do Brasil e na detecção de padrões espaciais das tendências de indicadores de extremos climáticos, podendo assim ser utilizada de modo satisfatório em estudos climatológicos de impactos regionais.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the performance of ERA5 reanalysis in the representation of air temperature and precipitation climatology and climate extreme indices trends in Brazil from 1981 to 2018. The climatology and trends from ERA5 reanalysis are verified with information from the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) and the Agência Nacional de Águas (ANA). We calculated 15 climate indices associated with precipitation and air temperature using the FClimDex software. The results show that the ERA5 reanalysis represents well the spatial and temporal climatological patterns of precipitation and air temperature in Brazil. However, there are occasional underestimations and overestimations of precipitation and minimum temperature and a general underestimation of the maximum temperature over the country. Regarding trends in climatic extremes, the ERA5 reanalysis, in general, is in agreement with observational data and points towards a reduction in precipitation in the central-northern portion of Brazil, in addition to heterogeneous signs in the Amazon. However, for the southern region, reanalysis shows an absence or a tendency to reduce the extremes of precipitation, while the observed data indicate the opposite. For temperature, ERA5 reanalysis, when compared to observational data, represents the warming trend in most parts of the country, with a reduction in cold nights and days and an increase in warm days and nights. In this way, the ERA5 reanalysis proved to be a good tool in the climatological characterization of Brazil and in the detection of spatial patterns of extreme climate indices trends, thus being able to be used satisfactorily in climatological studies of regional impacts.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Tendências Identificadas em Extremos Climáticos através de Dados Observacionais.....	3
2.2 Climatologia e Tendências Observadas em Extremos Climáticos por meio de Reanálises	9
CAPÍTULO III – DADOS E METODOLOGIA	14
3.1 Reanálise ERA5.....	14
3.2 Indicadores de Extremos Climáticos	15
CAPÍTULO IV – CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA.....	17
4.1 Precipitação	17
4.2 Temperaturas Mínima e Máxima	20
CAPÍTULO V - TENDÊNCIAS OBSERVADAS EM EXTREMOS CLIMÁTICOS	25
5.1 Tendências de Precipitação	25
5.2 Tendências de Temperatura	33
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:	Tendências (%dias/41 anos) para a) Noites Frias, b) Dias Frios, c) Noites Quentes e d) Dias Quentes no período 1960-2000. Fonte: Vincent et al. (2005).	5
Figura 2.2:	Sinal da tendência linear nos índices de precipitação avaliado pelo método Kendall's Tau, para a) R95p (dias muito chuvosos), b) R99p (dias extremamente chuvosos), c) RX5day (máxima precipitação total em 5 dias consecutivos) e d) R20mm (dias de precipitação muito forte). Fonte: Haylock et al. (2006).	6
Figura 2.3:	Tendências locais anuais estimadas para o período 1969-2009 para a) noites frias, b) dias frios, c) noites quentes e d) dias quentes. Círculos cheios representam séries onde as tendências são estatisticamente significativas. Fonte: Skansi et al. (2013).	7
Figura 2.4:	Tendências locais anuais estimadas para o período 1969-2009 para a) PRCPTOT (total pluviométrico anual – mm/década), b) R95p (dias muito chuvosos - mm/década), c) R99p (dias extremamente chuvosos - mm/década), d) RX5day (máxima precipitação em 5 dias consecutivos - mm/década) e e) RX1day (máxima precipitação em 1 dia - mm/década). Fonte: Skansi et al. (2013).	8
Figura 2.5:	Magnitudes das tendências (dias/década) de noites quentes (acima) e de dias quentes (abaixo) ao longo do período 1951-2010 (Fonte: IPCC, 2013).	9

Figura 2.6:	Coeficientes de correlação entre dados observacionais e dados da reanálise NCEP/NCAR para os índices WN (noites quentes) e PRCPTOT (total pluviométrico anual) no período 1961-1990. Fonte: Dufek et al. (2008).	10
Figura 2.7:	Tendências decadais de TXx (°C/década) no período 1979-2010. Fonte: Donat et al. (2014).	11
Figura 2.8	Tendências para séries anuais de a) R10mm (dias de precipitação forte – dias/10 anos) e b) R95pTOT (contribuição dos dias muito chuvosos - %/10 anos), considerando o período 1961-2018 e o conjunto de dados HadEX3. Fonte: Dunn et al. (2020).	13
Figura 4.1:	Climatologia da precipitação acumulada anual (mm/ano) no Brasil no período de 1981 a 2010 pela (a) reanálise ERA5 e pela (b) Normal Climatológica do INMET.	18
Figura 4.2:	Climatologia da precipitação acumulada do mês de janeiro (mm/mês) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	19
Figura 4.3:	Climatologia da precipitação acumulada do mês de julho (mm/mês) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	20
Figura 4.4:	Climatologia da temperatura mínima do mês de janeiro (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	21
Figura 4.5:	Climatologia da temperatura mínima do mês de julho (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	22

Figura 4.6:	Climatologia da temperatura máxima do mês de janeiro (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	23
Figura 4.7:	Climatologia da temperatura máxima do mês de julho (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.	24
Figura 5.1:	Tendências do indicador PRCPTOT (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	26
Figura 5.2:	Tendências do indicador RX5day (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	27
Figura 5.3:	Tendências do indicador R30mm (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	28
Figura 5.4:	Tendências do indicador R95p (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	29

Figura 5.5:	Tendências do indicador R99p (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	30
Figura 5.6:	Tendências do indicador CWD (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	31
Figura 5.7:	Tendências do indicador CDD (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).	32
Figura 5.8:	Tendências do indicador TX90p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	34
Figura 5.9:	Tendências do indicador TN90p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	35
Figura 5.10:	Tendências do indicador TX10p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o	36

	período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	
Figura 5.11:	Tendências do indicador TN10p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	37
Figura 5.12:	Tendências do indicador TXx (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	38
Figura 5.13:	Tendências do indicador TNx (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	39
Figura 5.14:	Tendências do indicador TXn (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	40
Figura 5.15:	Tendências do indicador TNn (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela1:	Indicadores de extremos climáticos utilizados neste trabalho.	15
-----------------	--	-----------

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AS	América do Sul
AR5	Fifth Assessment Report
CDS	Climate Data Store
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CRU	Climatic Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium Range Weather Forecasts
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
ERA	European Centre for Medium Range Weather Forecast ReAnalysis
FAR	First Assessment Report
FGGE	First Global Experiment of the Global Atmospheric Research Programme
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MERRA	Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
OMM	Organização Meteorológica Mundial
SAR	Second Assessment Report
SREX	Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation

TAR	Third Assessment Report
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UDEL	University of Delaware

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As alterações na frequência e na intensidade de eventos climáticos extremos como secas prolongadas, tempestades severas, ondas de calor e de frio vêm ocorrendo em diversas partes do globo e podem provocar acentuados prejuízos ambientais e socioeconômicos (IPCC, 2013). Um extremo climático é caracterizado como um evento raro, em geral associado à precipitação, temperatura do ar ou a intensidade do vento numa dada localidade e num determinado período do ano (CUBASCH et al., 2013).

Alguns extremos climáticos (por exemplo, secas e inundações) podem ser o resultado de um acúmulo de eventos de tempo e clima que não são extremos individualmente (apesar do seu acúmulo representar um evento extremo). Da mesma forma, eventos de tempo e clima, mesmo que não sejam extremos num sentido estatístico, podem ainda levar a condições extremas, ambos por cruzar um limiar crítico nos sistemas social, ecológico ou físico, ou por ocorrer simultaneamente com outros eventos. Um ciclone tropical por exemplo, pode ter um impacto extremo dependendo de onde e quando ele toca o solo, mesmo que não seja relativamente extremo em relação a outros ciclones tropicais. Por outro lado, nem todos os extremos necessariamente causam sérios impactos (Seneviratne et al., 2012).

No Brasil, numerosos estudos já mostraram que tais mudanças no clima são notórias em várias áreas do país (Marengo et al., 2010; Skansi et al., 2013; Donat et al., 2016; Soares et al., 2017; Dunn et al., 2020; Regoto, 2020; entre outros). A principal preocupação está voltada para os impactos da alteração do clima em setores estratégicos brasileiros, como agricultura e energia. Além disso, os efeitos das ilhas de calor em todos os grandes centros urbanos são agravados pelo aquecimento generalizado. As conclusões dessas pesquisas são tomadas através da análise pormenorizada de longas séries de dados diários observados de variáveis meteorológicas.

Contudo, em diversas regiões do mundo e, em particular, do Brasil, uma das grandes complexidades para identificar tendências em extremos climáticos está associada à debilitada qualidade e quantidade de informações acessíveis. Em alguns casos, a dificuldade de acesso e a falta de manutenção dos equipamentos acabam produzindo séries históricas com falhas e registros inconsistentes. Assim, uma das soluções é a utilização de dados de reanálise, ou seja, análises retrospectivas geradas através da assimilação de dados observacionais de diferentes

fontes em um modelo numérico invariante de forma a produzir conjuntos de dados contínuos, consistentes, e uniformemente distribuídos pelo planeta (Bengtsson e Shukla, 1988). Os dados de reanálise vêm se apresentando como uma eficaz ferramenta para estudos acerca da dinâmica da atmosfera, de variabilidade e mudanças climáticas, além de avaliação de modelos climáticos (Parker, 2016).

De acordo com Bengtsson et al. (2004), tendências climáticas fictícias de longo prazo podem ser detectadas pelas reanálises em função da introdução de novos tipos de observação e do aumento no número de registros no decorrer dos anos. Thorne e Vose (2010) afirmam que os desvios existentes nas reanálises podem reduzir sua utilidade em termos de monitoramento de tendências climáticas. Contudo, isso não significa que tais informações sejam inadequadas para todo o planeta, sendo fundamental a avaliação prévia de tais reanálises, confrontando-as com dados observados *in situ*, antes de utilizá-las. Nesse contexto, salienta-se a relevância em elaborar uma comparação minuciosa entre as tendências observadas através de dados de estações meteorológicas e as tendências identificadas por meio de reanálises.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a performance da reanálise *European Centre for Medium Range Weather Forecast Reanalysis 5* – ERA5 (Hersbach et al., 2020) na representação de extremos climáticos de precipitação e de temperatura do ar no Brasil no decorrer das últimas décadas, utilizando saídas diárias no período compreendido entre 1981 e 2018. As tendências geradas a partir dos dados da reanálise ERA5 são confrontadas com as tendências calculadas por Regoto (2020) a partir de dados observacionais de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA).

No Capítulo 2, elabora-se uma revisão bibliográfica sobre extremos climáticos de precipitação e temperatura do ar. No Capítulo 3 são apresentados os dados e a metodologia do trabalho. Os resultados são mostrados nos Capítulos 4 e 5, e finalmente, no Capítulo 6 estão as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maior parte das pesquisas relacionadas com extremos climáticos se baseia na utilização dos indicadores de extremos climáticos criados pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI) no início dos anos 2000. O ETCCDI foi estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo *Research Program Climate Variability and Predictability* (CLIVAR) para o desenvolvimento e análise de índices de mudanças climáticas focando primariamente em extremos. Tais indicadores são fundamentados pela probabilidade de ocorrência de quantidades pré-determinadas ou na excedência de limiares de algumas variáveis climáticas. A vantagem de utilizar indicadores de extremos pré-definidos é que eles possibilitam comparações em estudos que envolvem modelagem e dados observados, além de diferentes regiões do globo (Seneviratne et al., 2012).

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura sobre a detecção de tendências em extremos climáticos de precipitação e de temperatura no decorrer das últimas décadas e a utilização de reanálises na tentativa de representá-las.

2.1 Tendências Identificadas em Extremos Climáticos através de Dados Observacionais

Em um dos trabalhos pioneiros na análise dos extremos climáticos a nível global, Frich et al. (2002) utilizam índices baseados em valores diários de temperaturas máxima (TX) e mínima (TN), e nos totais pluviométricos diários (PREC). Apenas séries com 40 anos ou mais de registros são utilizadas. Os resultados desse estudo indicam um aquecimento em grande parte do globo no período de 1946 a 1999, com decréscimo mundial uniforme do número de dias com temperatura mínima inferior a 0°C. Em muitas partes do planeta, a amplitude dos extremos de temperaturas máxima e mínima ao longo dos anos indica um declínio sistemático e estatisticamente significativo no decorrer da segunda metade do século XX. De uma forma geral, os índices relacionados aos extremos de precipitação mostram um padrão heterogêneo no globo, com alterações positivas e negativas.

No artigo de Alexander et al. (2006) são reunidos dados globais, coletados nos diversos workshops promovidos pelo ETCCDI. Isso permitiu a apresentação do mais abrangente e atualizado quadro mundial até aquele momento das tendências nos indicadores de extremos de temperatura e precipitação. Índices sazonais e anuais para o período de 1951 a 2003 foram avaliados e as tendências em tais indicadores passaram por um teste de significância estatística. Os resultados mostram alterações significativas generalizadas nos indicadores de extremos de temperatura associados a um aquecimento, especialmente para aqueles índices baseados em TN. Mais de 70% da área terrestre do planeta mostra uma evidente diminuição (aumento) na ocorrência anual de noites frias (quentes). Os indicadores de extremos de TX mostram mudanças semelhantes, mas com magnitudes inferiores. Assim como em Frich et al. (2002), as alterações na precipitação apresentam um padrão mais heterogêneo pelo globo quando comparadas com as mudanças na temperatura.

Especificamente para a América do Sul (AS), alguns trabalhos relacionados à identificação de tendências em extremos climáticos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos. Vincent et al. (2005) analisam as tendências observadas nos indicadores de extremos de temperatura em 68 estações meteorológicas no período de 1960 a 2000. Os resultados mostram que há poucas estações com tendências significativas tanto negativas quanto positivas nos índices baseados em TX. Contrariamente, os indicadores baseados em TN exibem tendências mais expressivas (Figura 2.1). Tendências estatisticamente significativas de redução das noites frias e aumento das noites quentes são observadas em várias estações localizadas ao longo das costas leste e oeste da AS. No interior do continente sul-americano, observam-se menos estações com tendências estatisticamente significativas. A amplitude térmica diária média decresceu cerca de 2 a 3°C em muitas localidades.

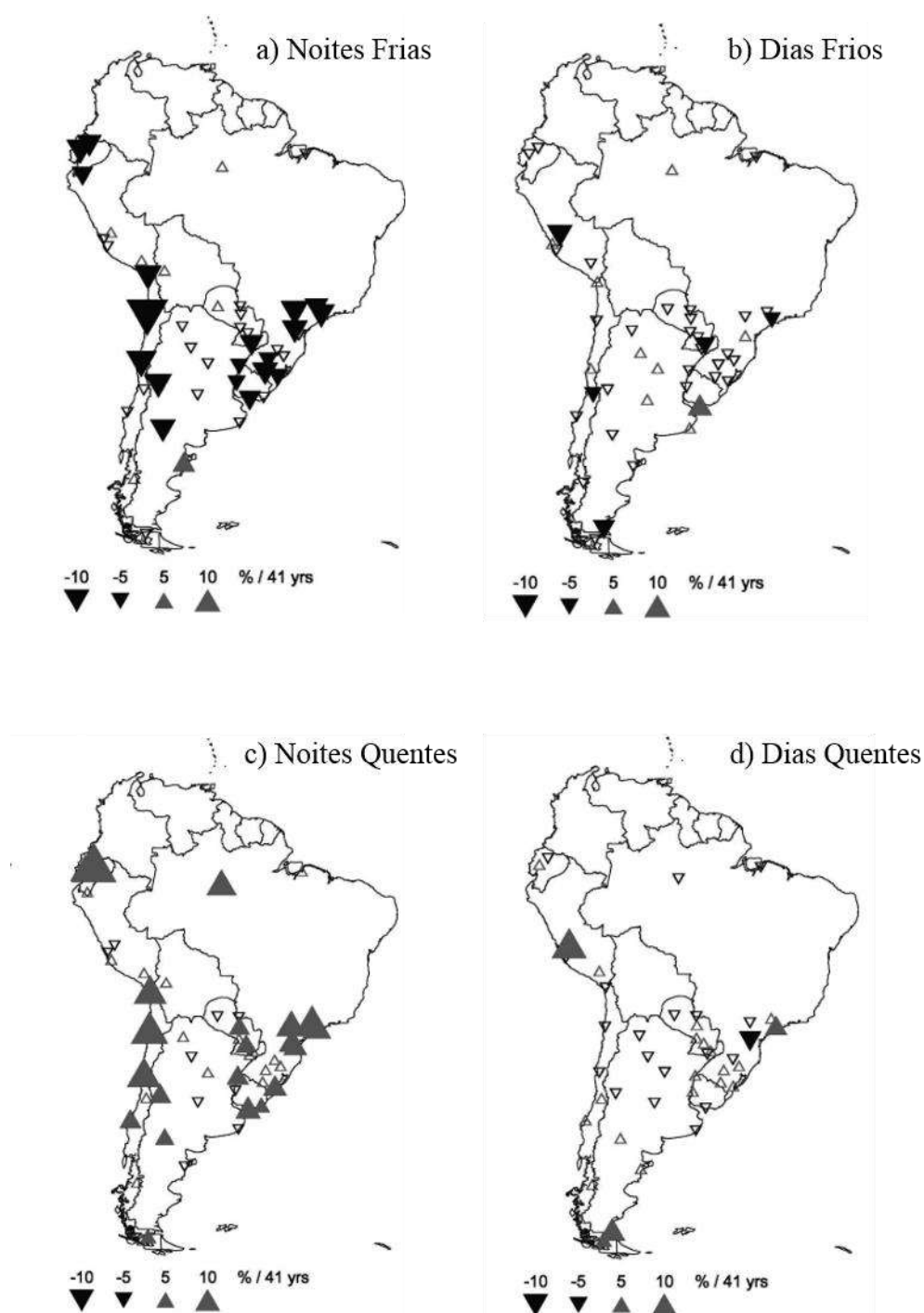


Figura 2.1 - Tendências (%dias/41 anos) para a) Noites Frias, b) Dias Frios, c) Noites Quentes e d) Dias Quentes no período 1960-2000. Os triângulos para cima (cinza) e para baixo (preto) indicam tendências positiva e negativa, respectivamente. Os triângulos preenchidos correspondem a tendências estatisticamente significativas no nível de 5%. O tamanho do triângulo é proporcional à magnitude da tendência. Fonte: Vincent et al. (2005).

As tendências observadas em indicadores de extremos climáticos associados à precipitação na AS entre 1960 e 2000 foram primariamente discutidas por Haylock et al (2006). Os autores mostraram que o padrão de tendências para os extremos de precipitação é geralmente o mesmo do total pluviométrico anual, sendo de mudança para condições mais chuvosas no

Equador, no norte do Peru, na região Sul do Brasil, no Paraguai, no Uruguai e no centro-norte da Argentina (Figura 2.2).

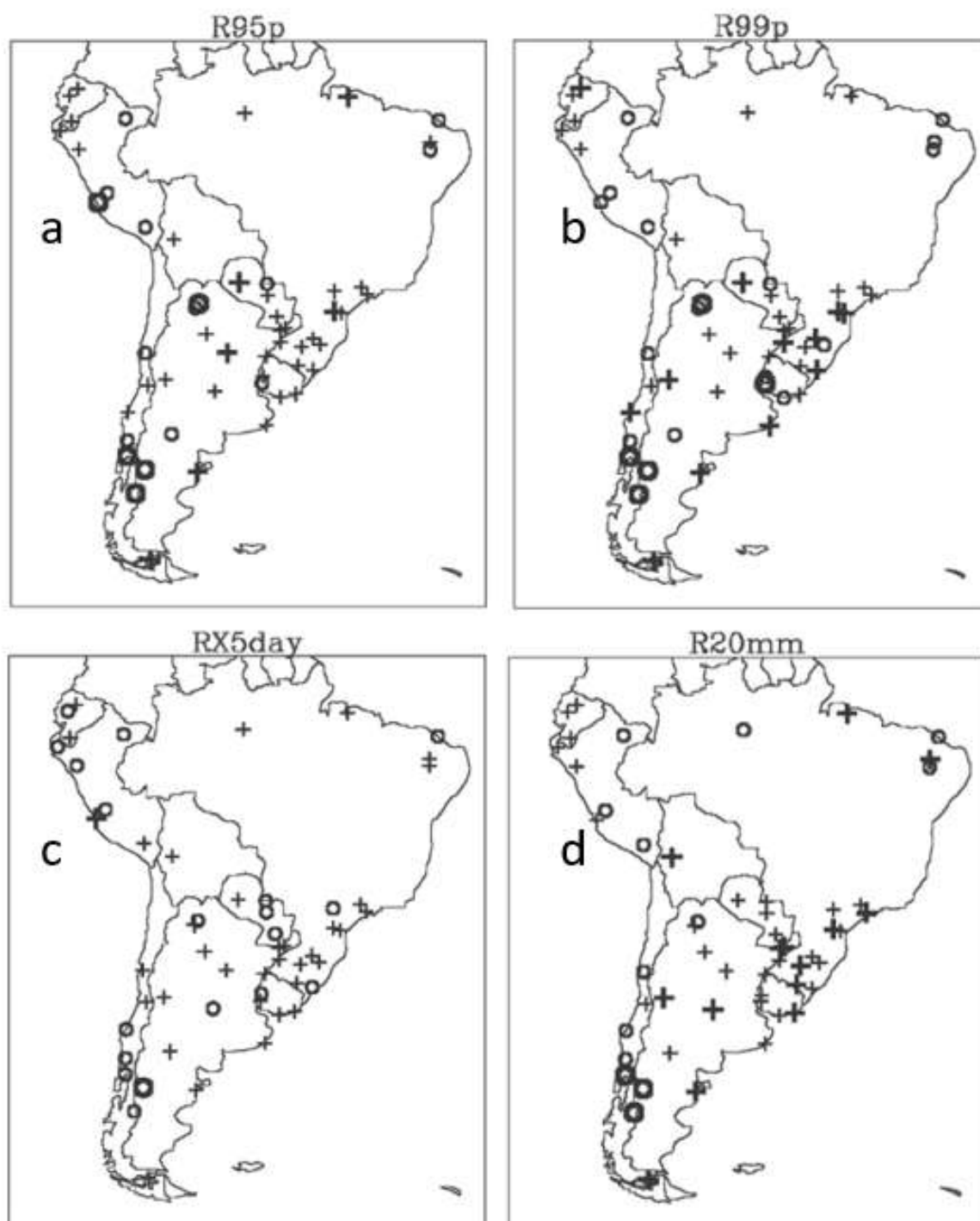


Figura 2.2 - Sinal da tendência linear nos índices de precipitação avaliado pelo método Kendall's Tau, para a) R95p (dias muito chuvosos), b) R99p (dias extremamente chuvosos), c) RX5day (máxima precipitação total em 5 dias consecutivos) e d) R20mm (dias de precipitação muito forte). Um aumento é apresentado pelo símbolo de soma e decréscimo por um círculo. Valores em negrito indicam significância em $p < 0,05$. Fonte: Haylock et al. (2006).

Posteriormente, em outro estudo utilizando mais estações meteorológicas sobre a AS entre 1960 e 2010, Skansi et al. (2013) reforçam as evidências de um aquecimento generalizado em todo o continente, ou seja, aumento (redução) de dias e noites quentes (frios) (Figura 2.3), assim como aumento das ondas de calor. Os autores relatam também que no decorrer do século XX, os extremos de precipitação se tornaram mais frequentes e intensos no sudeste da AS (Figura 2.4).

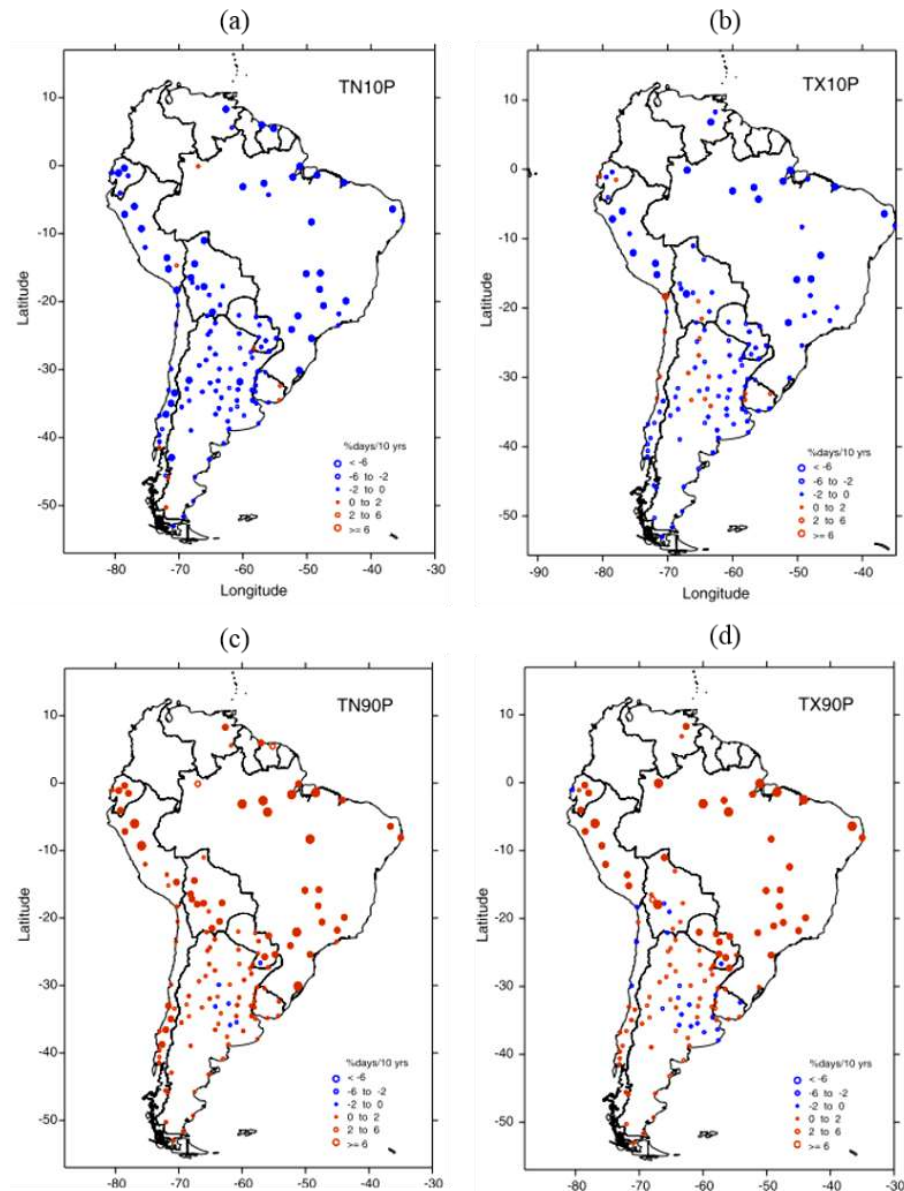


Figura 2.3 - Tendências locais anuais estimadas para o período 1969-2009 para a) Noites Frias, b) Dias Frios, c) Noites Quentes e d) Dias Quentes. Círculos cheios representam séries onde as tendências são estatisticamente significativas. Fonte: Skansi et al. (2013).

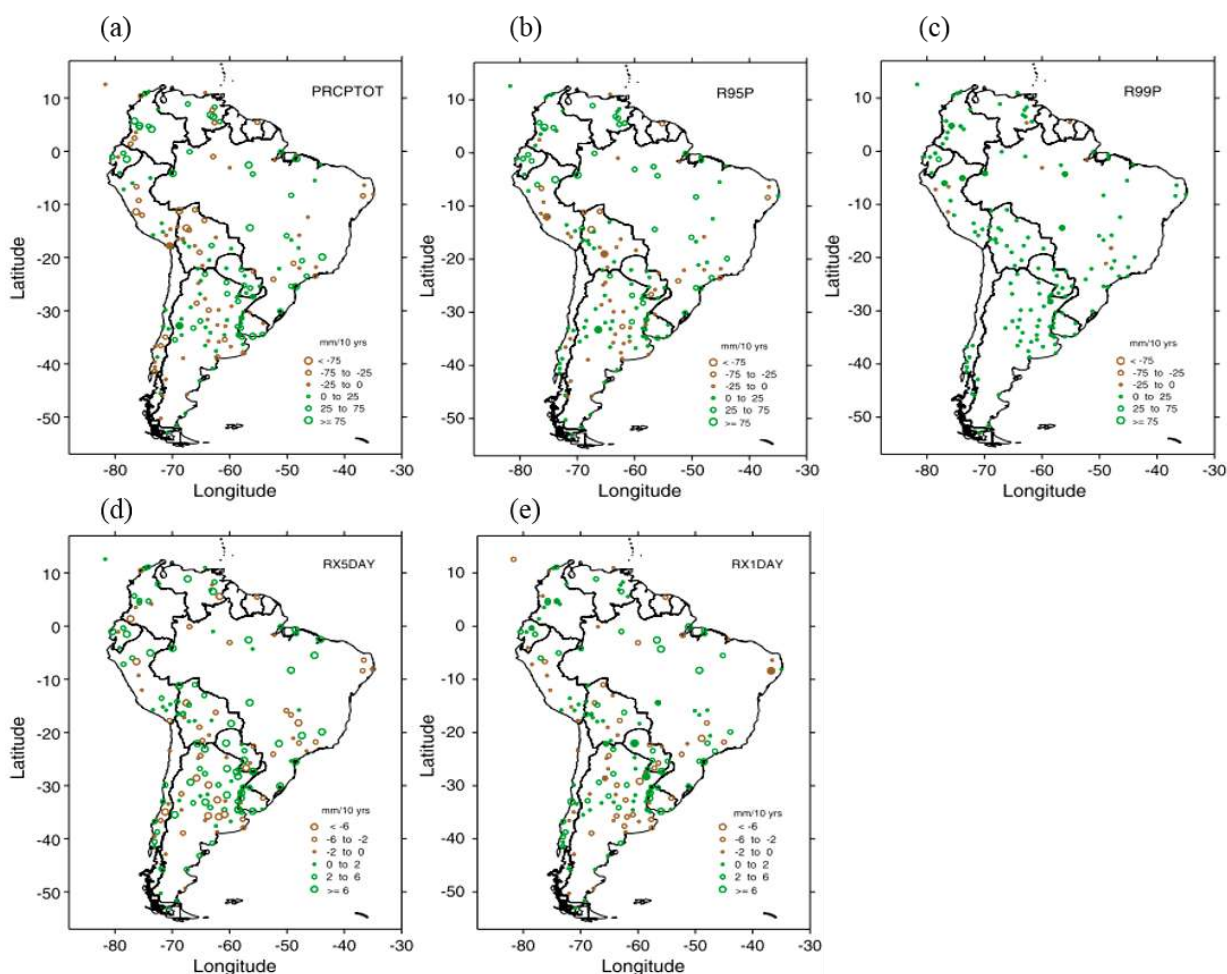


Figura 2.4 - Tendências locais anuais estimadas para o período 1969-2009 para a) PRCPTOT (total pluviométrico anual – mm/década), b) R95p (dias muito chuvosos - mm/década), c) R99p (dias extremamente chuvosos - mm/década), d) RX5day (máxima precipitação em 5 dias consecutivos - mm/década), e e) RX1day (máxima precipitação em 1 dia - mm/década). Fonte: Skansi et al. (2013).

Nos relatórios de Avaliação da Mudança Climática (Assessment Reports) elaborados pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática) a cada cinco ou seis anos, é apresentada uma síntese dos principais estudos da comunidade científica sobre o tema. Nos primeiros relatórios, o First Assessment Report (FAR - IPCC, 1990) e o Second Assessment Report (SAR - IPCC, 1995), havia informações limitadas sobre as alterações no comportamento dos eventos climáticos extremos. A partir do Third Assessment Report (TAR - IPCC, 2001), o tema passou a ser mais aprofundado. Entre o Fourth Assessment Report (AR4 - IPCC, 2007) e o Fifth Assessment Report (AR5 - IPCC, 2013), foi publicado um relatório especial focado nos riscos de eventos extremos e desastres, intitulado Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX – IPCC, 2012).

O AR5 do IPCC compendia todas as pesquisas publicadas até aquele momento acerca das tendências observadas em extremos climáticos ao redor do planeta. De acordo com o relatório, as décadas de 1980 a 2010 foram as mais quentes no globo desde 1850. A frequência de noites e dias quentes tem apresentado de fato um aumento em grande parte do planeta, inclusive no Brasil, onde a magnitude dessa elevação alcança até 12 dias por década desde 1951, principalmente no centro-sul do país (Figura 2.5). Quanto aos índices de precipitação, apesar das mudanças apresentarem uma distribuição mais heterogênea sobre o globo, também se verificam tendências significativas de aumento e de diminuição de chuvas intensas e de períodos de seca em diversas regiões.

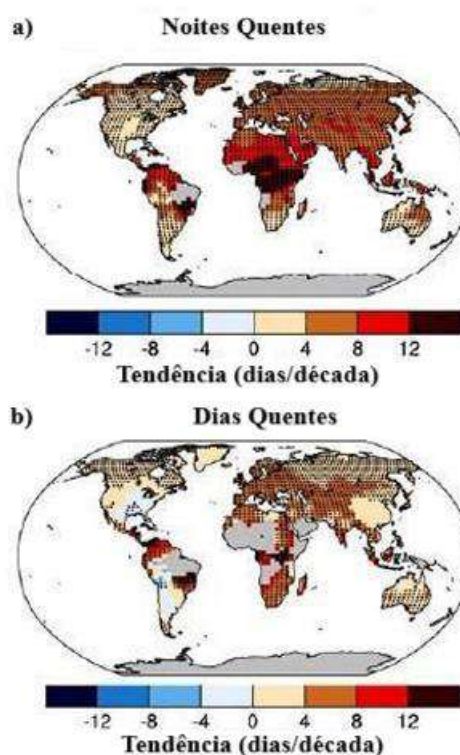


Figura 2.5 – Magnitudes das tendências (dias/década) de a) noites quentes e de dias b) dias quentes ao longo do período 1951-2010 (Fonte: IPCC, 2013).

2.2 Climatologia e Tendências Observadas em Extremos Climáticos por meio de Reanálises

Uma avaliação da precipitação sobre a América do Sul com dados das reanálises *Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications* – MERRA (Rienecker et al. 2011) e *Climate Forecast System Reanalysis* – CFSR (SAHA et al., 2010, 2014) entre 1999 e 2008 foi realizada por Nascimento et al. (2010). Uma elevada correlação espacial foi encontrada entre as reanálises e os dados do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), principalmente sobre a Bacia Amazônica e a Bacia do Prata. Entretanto, na Bacia Amazônica, nas estações mais

secas do ano (inverno e primavera) houve subestimativa da precipitação e nas estações mais chuvosas (verão e outono) houve superestimativa. Além disso, ressalta-se que na Bacia do Prata houve subestimativa ao longo de todo o ano.

Dufek et al. (2008) verificaram se a reanálise do *National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research* - NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) pode ser usada para estimar extremos de temperatura e precipitação e suas tendências, utilizando dados diários num período de 30 anos (1961-1990). Alguns índices de extremos climáticos anuais foram calculados e correlacionados com dados observacionais de estações no Brasil e no estado de São Paulo. Os resultados mostram que a reanálise NCEP/NCAR possui uma alta correlação com os dados observacionais nos índices de noites quentes (WN) e total pluviométrico anual (PRCPTOT; Figura 2.6).

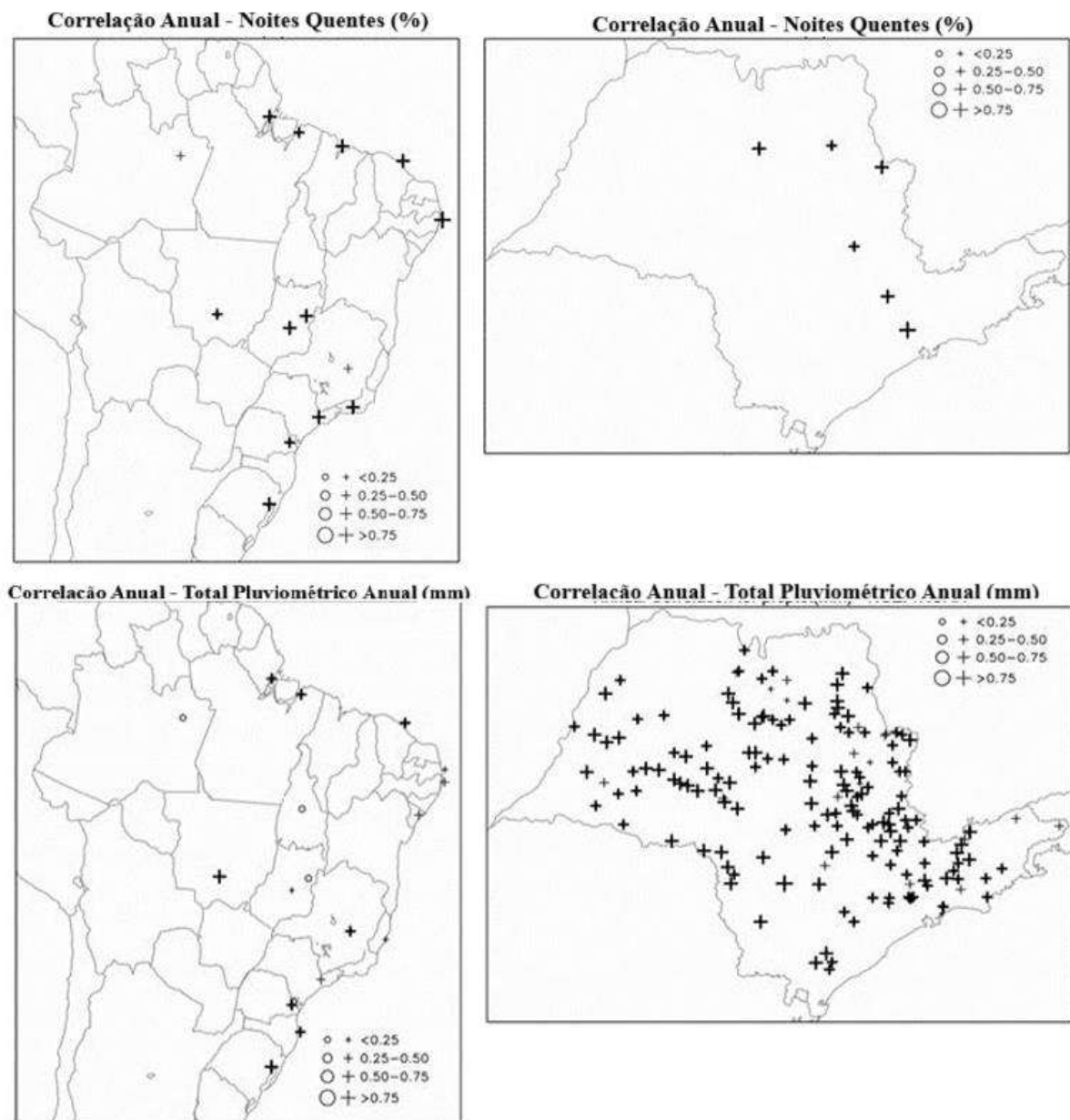


Figura 2.6 — Coeficientes de correlação entre dados observacionais e dados da reanálise NCEP/NCAR para os índices de noites quentes e do total pluviométrico anual no período 1961-1990. Uma correlação positiva é indicada por ‘+’, uma negativa por ‘o’ e a intensidade pelo tamanho dos símbolos. Os valores em negrito indicam correlações estatisticamente significativas ao nível de significância de 5%. Fonte: Dufek et al. (2008).

Uma avaliação das tendências em extremos de temperatura e precipitação em todo o globo através de dados de reanálises e dados *in situ* em pontos de grade foi feita por Donat et al. (2014). Diversas bases de dados são utilizadas como o HadEX2 (Donat et al., 013a), GHCNDEX (Donat et al., 2013b), HadGHCND (Caesar et al., 2006) e as reanálises NCEP-1 (Kalnay et al., 2006), ERA-40 (Uppala et al., 2005), NCEP-2 (Kanamitsu et al., 2002), ERA-Interim (Dee et al., 2011a)

e JRA-25 (Onogi et al., 2007). Foi detectada, por todas as reanálises, uma tendência de aumento da maior temperatura máxima anual (TXx) sobre o Norte e Nordeste do Brasil (Figura 2.7). Entretanto, as tendências de resfriamento na costa oeste da AS são discrepantes entre as reanálises, com a NCEP-1 indicando uma redução extrema de TXx em vastas áreas em baixas latitudes. Para a precipitação, os autores encontraram padrões inconsistentes através das reanálises na AS, com a ERA-Interim apresentando um aumento significativo da precipitação extrema enquanto a reanálise NCEP-2 apresenta, predominantemente, uma tendência de redução. Nas demais reanálises não se observam padrões significativos de tendências para a região. Os autores concluem que as tendências de extremos de temperatura e precipitação apresentados pelas reanálises na AS são diferentes entre si devido à baixa cobertura de dados *in situ* disponíveis na região.

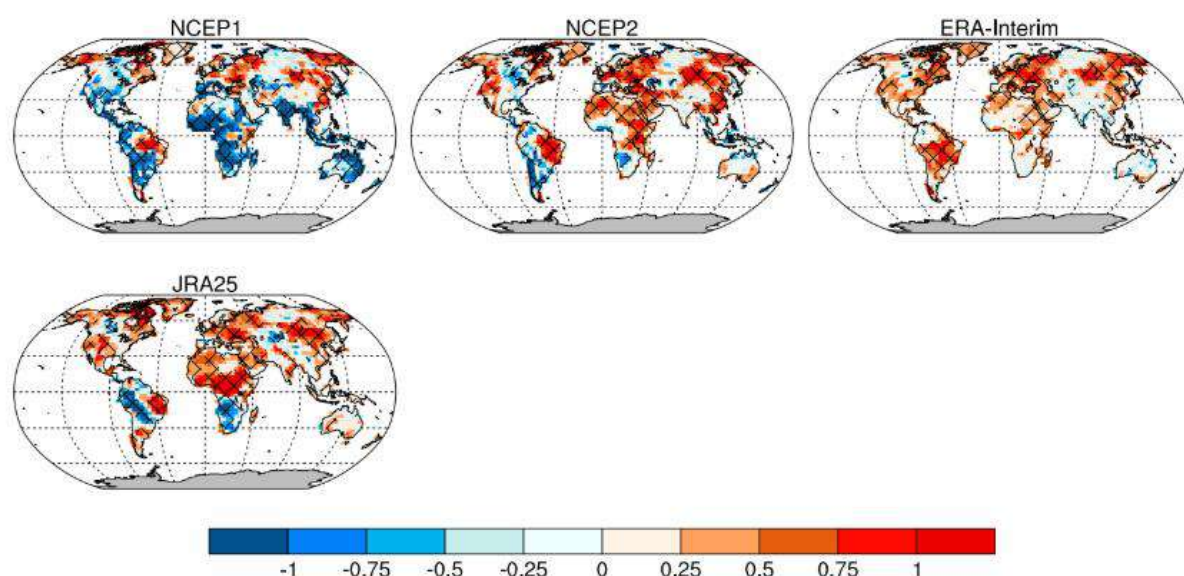


Figura 2.7 — Tendências decadais de TXx (°C/década) no período 1979-2010. As tendências são calculadas apenas para pontos de grade em terra que possuem, pelo menos, uma série de 10 anos de dados. As áreas hachuradas indicam tendências significativas ($p \leq 0.05$; teste de Mann–Kendall). Fonte: Donat et al. (2014)

Soares et al. (2017) estudaram tendências de temperatura e precipitação na AS utilizando três conjuntos de dados observacionais em pontos de grade: CRU (Climatic Research Unit) v. 3.22 (Harris et al., 2014), UDEL (University of Delaware) v.2.01 (Matsuura and Willmott, 2009), e GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) *full* v.6 (Schneider et al., 2011; Schneider et al., 2014), nos períodos de 1975-2004 para a temperatura e de 1955-2004 para a precipitação. A significância estatística foi calculada utilizando simulações de controle pré-industriais da quinta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5 - Taylor et al., 2012). Tendências de

aquecimento generalizado são encontradas na AS, estando de acordo com o AR5 e indicando, através das simulações do CMIP5, que o aquecimento possui causas antropogênicas. Entretanto, não foi encontrado um padrão espacial definido para a tendência de precipitação, sendo apresentados sinais inversos por todo o continente e em curtas distâncias entre si.

Recentemente, Dunn et al. (2020) desenvolveram um novo conjunto de dados global de extremos de temperatura e precipitação (HadEX3) e analisam suas tendências no período de 1950 a 2018. Ratificando os estudos anteriores, os resultados obtidos em relação aos extremos de temperatura mostram que suas mudanças anuais são consistentes com um mundo mais aquecido, e que os indicadores relacionados à TN sofrem alterações mais acentuadas do que os baseados em TX. Em relação à precipitação, Dunn et al. (2020) relatam que há indicações de aumentos a nível global da máxima precipitação diária, da frequência de chuvas mais fortes (R10mm), além de elevações na fração de precipitação intensa (R95pTOT) associada a eventos severos (Figura 2.8).

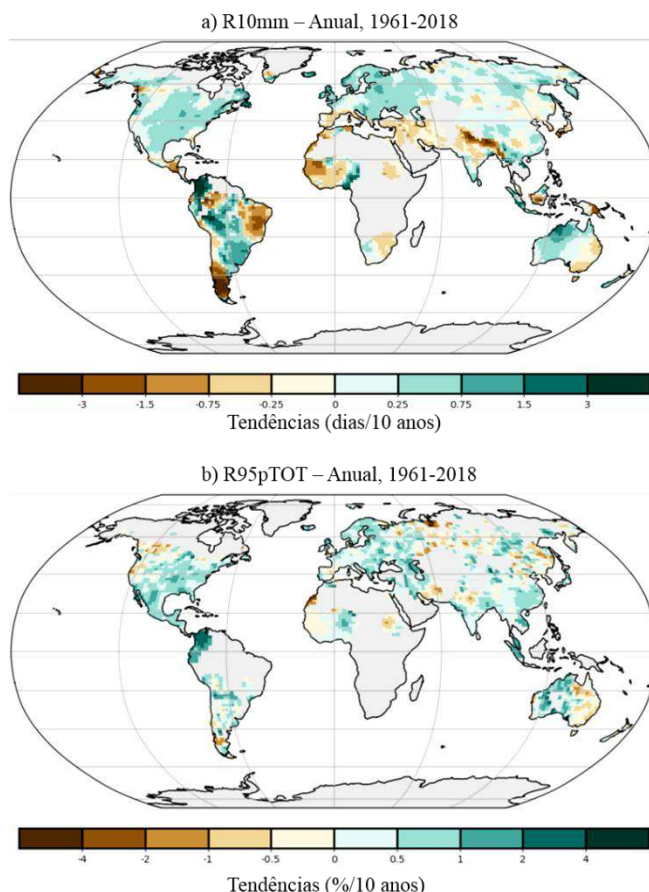


Figura 2.8 - Tendências para séries anuais de a) R10mm (dias de precipitação forte – dias/10 anos) e b) R95pTOT (contribuição dos dias muito chuvosos - %/10 anos), considerando o período 1961-2018 e o conjunto de dados HadEX3. As tendências são calculadas para as caixas de grade

com dados suficientes (pelo menos 66% de anos com dados e o último ano da série deve ser maior que 2009). O período de referência é 1961-1990, com resolução horizontal de $1,875^\circ \times 1,25^\circ$. Fonte: Dunn et al. (2020).

CAPÍTULO III

DADOS E METODOLOGIA

3.1. Reanálise ERA5

Neste estudo, utilizam-se 38 anos (1981-2018) de dados horários de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação oriundos da reanálise ERA5 sobre o Brasil. Esses dados horários foram posteriormente convertidos em dados diários, para que os indicadores de extremos climáticos associados à temperatura do ar e precipitação pudessem ser calculados. A precipitação acumulada de um dia é o somatório dos dados horários de precipitação entre 04Z deste dia e 03Z do dia posterior. Já a temperatura máxima (mínima) de um dia é o maior (menor) valor horário de temperatura máxima (mínima) nesse mesmo período.

A ERA5 é a quinta geração de reanálise global produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), após o *First Global Experiment of the Global Atmospheric Research Programme* (FGGE), a ERA-15, a ERA-40 e a ERA-Interim. A ERA5 começou a ser produzida no início de 2016. Durante 2017 e 2018 alguns períodos de dados da ERA5 foram disponibilizados através do *Copernicus Climate Change Service* (C3S) *Climate Data Store* (CDS - Raoult et al., 2017). Finalmente em janeiro de 2019, o conjunto completo horário da ERA5 desde 1979 até o presente foi disponibilizado no CDS. No primeiro trimestre de 2020 a ERA5 fornecerá um detalhado registro da atmosfera global, superfície terrestre e ondas oceânicas desde 1950 até os dias atuais. Além de sua alta resolução espacial, a ERA5 apresenta várias inovações em relação à antecessora reanálise ERA-Interim, incluindo saídas horárias e uma estimativa de incertezas. Tais informações sobre incertezas são obtidas de um conjunto de 10 membros de assimilação de dados com saídas a cada 3 horas na metade da resolução.

A reanálise ERA5 é gerada em grade Gaussiana, ou seja, usando diferentes números de pontos de grade ao longo de diferentes latitudes. A seguir é feita uma conversão para uma grade regular, mantendo a separação em pontos de grade, em metros, aproximadamente constante, ou seja, 31 km para a reanálise em alta resolução (determinística) e 63 km para os produtos dos

membros do conjunto (probabilística) e 40 km e 80 km, respectivamente para os produtos de ondas oceânicas. Na vertical essa reanálise apresenta 137 níveis (L137), desde 1000 hPa até 1 hPa. Sua resolução temporal é horária. A assimilação de dados ocorre a cada 12 horas (4d-Var). A reanálise ERA5 produz diversos parâmetros de saída, incluindo, por exemplo, o vento a 100 m de altura, precipitação, fluxos de superfície e temperaturas máxima e mínima. Um conjunto de dados com apenas 2 a 5 dias de atraso em relação à data real (ERA5T) e um produto final com qualidade controlada, com atraso de dois a três meses em relação ao tempo real são disponibilizados (Hersbach et al., 2019). A ERA5 será mantida como um produto operacional até meados de 2020, quando uma substituição estará disponível. Maiores detalhes sobre ERA5 podem ser obtidos em Hersbach et al. (2018).

3.2. Indicadores de Extremos Climáticos

Para este estudo, 15 índices de extremos climáticos anuais foram selecionados (Tabela 2), sendo sete relacionados à precipitação diária e oito relacionados às temperaturas mínima e máxima diárias. Esses indicadores foram calculados através do *software* FClimDex (ZHANG e YANG, 2004). Tais índices de extremos climáticos foram calculados para cada um dos 11.483 pontos de grade da reanálise ERA5 no Brasil.

Tabela 1 – Indicadores de extremos climáticos utilizados neste trabalho.

<i>ID</i>	<i>NOME DO INDICADOR</i>	<i>DEFINIÇÃO</i>	<i>UNIDADE</i>
<i>Precipitação</i>			
PRCPTOT	Precipitação Total Anual nos Dias Úmidos	PREC total anual dos dias chuvosos (PREC diária ≥ 1 mm)	<i>mm</i>
R95p	Dias Muito Chuvosos	PREC total anual quando PREC diária > percentil 95	<i>mm</i>
R99p	Dias Extremamente Chuvosos	PREC total anual quando PREC diária > percentil 99	<i>mm</i>
RX5day	Máxima Precipitação Total em 5 dias	Máxima PREC anual em 5 dias consecutivos	<i>mm</i>
R30mm	Número de Dias acima de 30 mm	Número de dias quando PREC diária ≥ 30 mm	<i>dias</i>
CWD	Dias Chuvosos Consecutivos	Número máximo de dias chuvosos consecutivos no ano (PREC diária ≥ 1 mm)	<i>dias</i>
CDD	Dias Secos Consecutivos	Número máximo de dias secos consecutivos no ano (PREC diária < 1 mm)	<i>dias</i>
<i>Temperatura</i>			

TX90p	Dias Quentes	Porcentagem de dias quando TX > percentil 90	% dias
TN90p	Noites Quentes	Porcentagem de dias quando TN > percentil 90	% dias
TX10p	Dias Frios	Porcentagem de dias quando TX < percentil 10	% dias
TN10p	Noites Frias	Porcentagem de dias quando TN < percentil 10	% dias
TXx	Máxima TX	Máxima TX diária do ano	°C
TNx	Máxima TN	Máxima TN diária do ano	°C
TXn	Mínima TX	Mínima TX diária do ano	°C
TNn	Mínima TN	Mínima TN diária do ano	°C

Os resultados encontrados foram confrontados com os resultados obtidos por Regoto (2020) utilizando dados observacionais de estações meteorológicas e pluviométricas no Brasil do INMET e da ANA, em um período de 58 anos (1961-2018). Essa comparação permite avaliar a performance da reanálise ERA5 na representação das tendências observadas em extremos climáticos de precipitação e de temperatura do ar no Brasil no decorrer das últimas décadas. Os dados aqui produzidos são interpolados sobre o Brasil com o auxílio do software ArcGis®.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA

Neste capítulo, apresentam-se os principais aspectos da climatologia da precipitação e das temperaturas máxima e mínima no Brasil, representados pela reanálise ERA5 no período de 1981 a 2010. Essa climatologia é confrontada com as Normais Climatológicas do INMET (<https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/>) para o mesmo período com o objetivo de avaliar a performance da reanálise ERA5 na representação da caracterização climatológica nas diferentes regiões do país.

4.1 Precipitação

A Figura 4.1 apresenta a climatologia da precipitação anual (mm/ano) no Brasil no período de 1981 a 2010. Na Figura 4.1a, a climatologia foi elaborada através dos dados da reanálise ERA5, enquanto a Figura 4.1b é oriunda do INMET. Nota-se de maneira geral uma boa representação dos principais padrões de precipitação pela reanálise ERA5.

Os máximos sobre a Região Norte, os mínimos na Região Nordeste e a região de transição entre esses dois extremos são muito bem representados. O aumento da precipitação desde as Regiões Centro-Oeste e Sudeste, em direção ao sul do país também merece destaque. Entretanto, em termos quantitativos, a reanálise estende por uma área maior no estado do Amazonas a região do máximo de precipitação e subestima em cerca de 200 mm/ano a precipitação anual na Região Nordeste do país. Observa-se, também, que o ERA5 superestima os acumulados anuais de chuva no litoral do Amapá e parte do Pará.

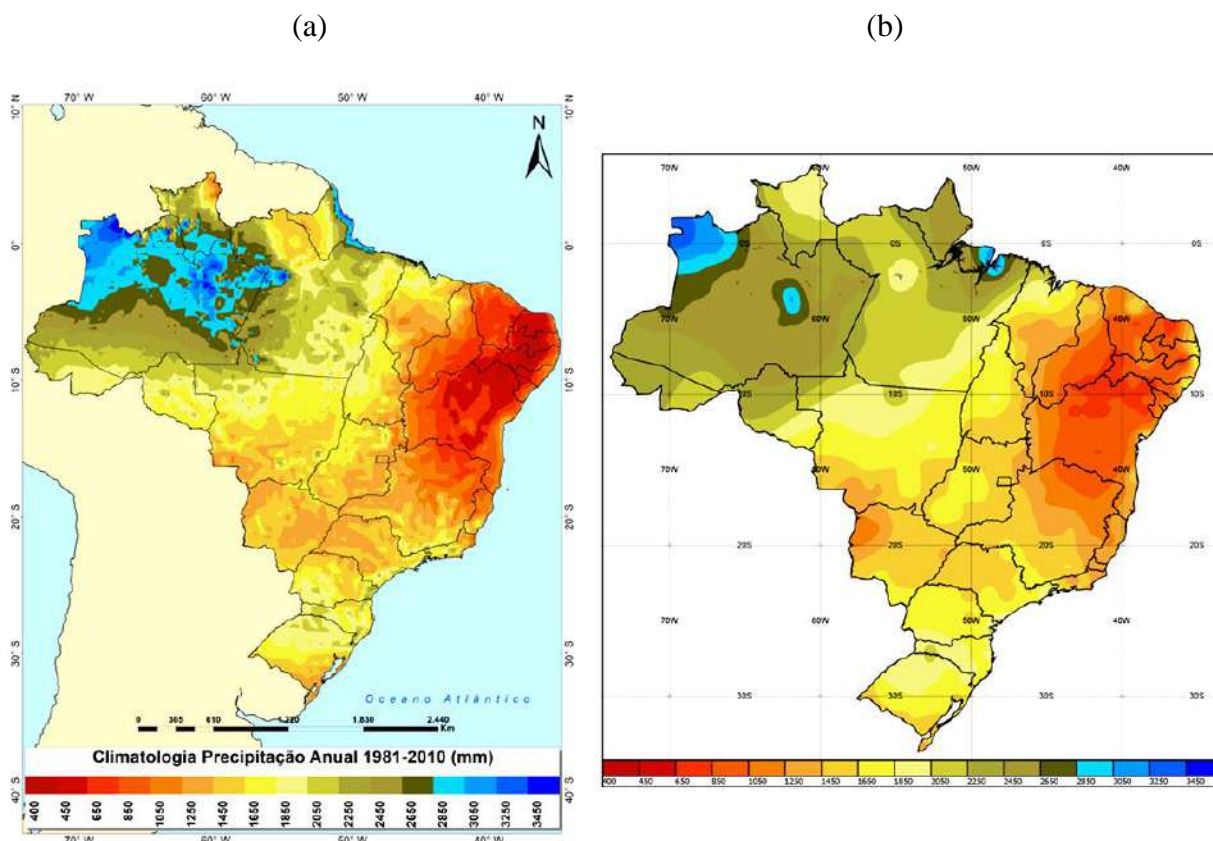


Figura 4.1 – Climatologia da precipitação acumulada anual (mm/ano) no Brasil no período de 1981 a 2010 pela (a) reanálise ERA5 e pela (b) Normal Climatológica do INMET.

De acordo com Kalnay (1996), campos de precipitação gerados por reanálises devem ser usados com muita cautela pois a precipitação, assim como os fluxos de superfície, são completamente determinados pelo modelo, considerados como variáveis tipo “C”. O campo de precipitação do CFSR, por exemplo, exibe um padrão espacial ondulado, provavelmente gerado por problemas numéricos. Dessa forma, a boa performance do ERA5 para gerar a climatologia da precipitação sobre o Brasil é um fato surpreendente.

Climatologicamente, o período mais chuvoso em grande parte do país ocorre entre os meses de outubro e março e o período mais seco entre abril e setembro, com os maiores acumulados de precipitação ocorrendo durante o verão austral (dezembro a fevereiro), e os menores acumulados ocorrendo no inverno austral (junho a agosto). As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam a climatologia da precipitação (mm/mês) dos meses de janeiro e de julho no Brasil

no período de 1981 a 2010, respectivamente. Nas Figuras 4.2a e 4.3a a climatologia foi construída com os dados da reanálise ERA5, enquanto as Figuras 4.2b e 4.3b apresentam a climatologia do INMET no mesmo período.

De maneira geral, a distribuição espacial da precipitação no mês de janeiro no Brasil também possui uma boa representação pela reanálise ERA5. Entretanto, quantitativamente, alguns pequenos desvios devem ser ressaltados. A reanálise superestima entre 100 e 200 mm/mês a precipitação acumulada em uma grande área da região Norte entre os estados do Amazonas e Pará, e subestima em até 40 mm/mês em Roraima e em cerca de 20 mm/mês na porção leste do Nordeste. Observa-se também que a reanálise ERA5 superestima a precipitação acumulada mensal no litoral do Amapá e em pequenas áreas das regiões Sudeste, Centro-Oeste e no estado do Paraná. Destaca-se aqui que essas áreas com superestimativa na Região Sudeste correspondem a regiões com topografia acentuada. Nota-se também que as superestimativas da precipitação acumulada mensal de janeiro na região Norte contribuem bastante para o resultado da superestimativa anual nessa região.

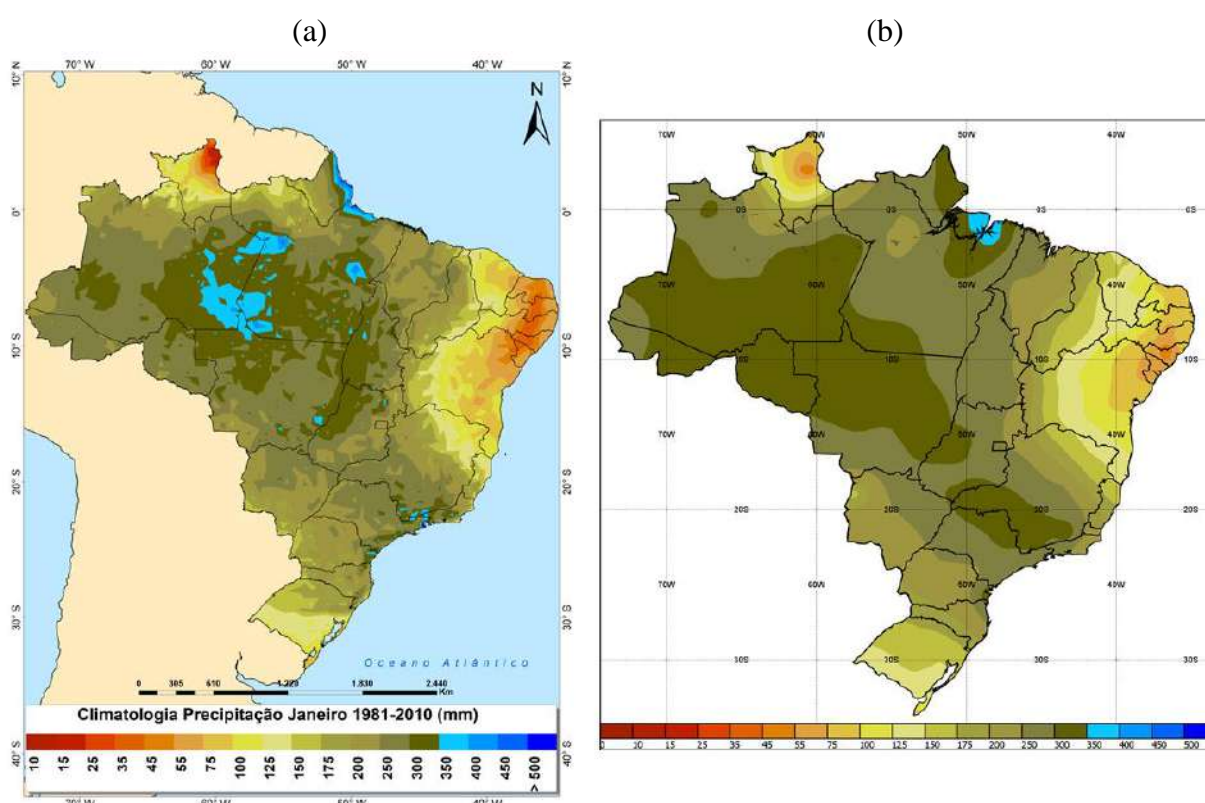


Figura 4.2 – Climatologia da precipitação acumulada do mês de janeiro (mm/mês) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.

Analisando a Figura 4.3 é possível observar que a reanálise ERA5 também representa satisfatoriamente a distribuição espacial da precipitação acumulada mensal ao longo do território

brasileiro no mês de julho. A grande área mais seca no centro do país, que se estende desde o Nordeste, passando por grande parte do Centro-Oeste e Sudeste, assim como as áreas de maior precipitação acumulada no norte da região Norte e na região Sul estão bem representadas. Entretanto, a reanálise estende por uma área maior a região mais seca no Nordeste, subestima em até 125 mm/mês a precipitação acumulada no litoral nordestino (região essa que apresenta sua estação chuvosa nessa época do ano) e superestima entre 50 e 100 mm/mês no noroeste do Amazonas.

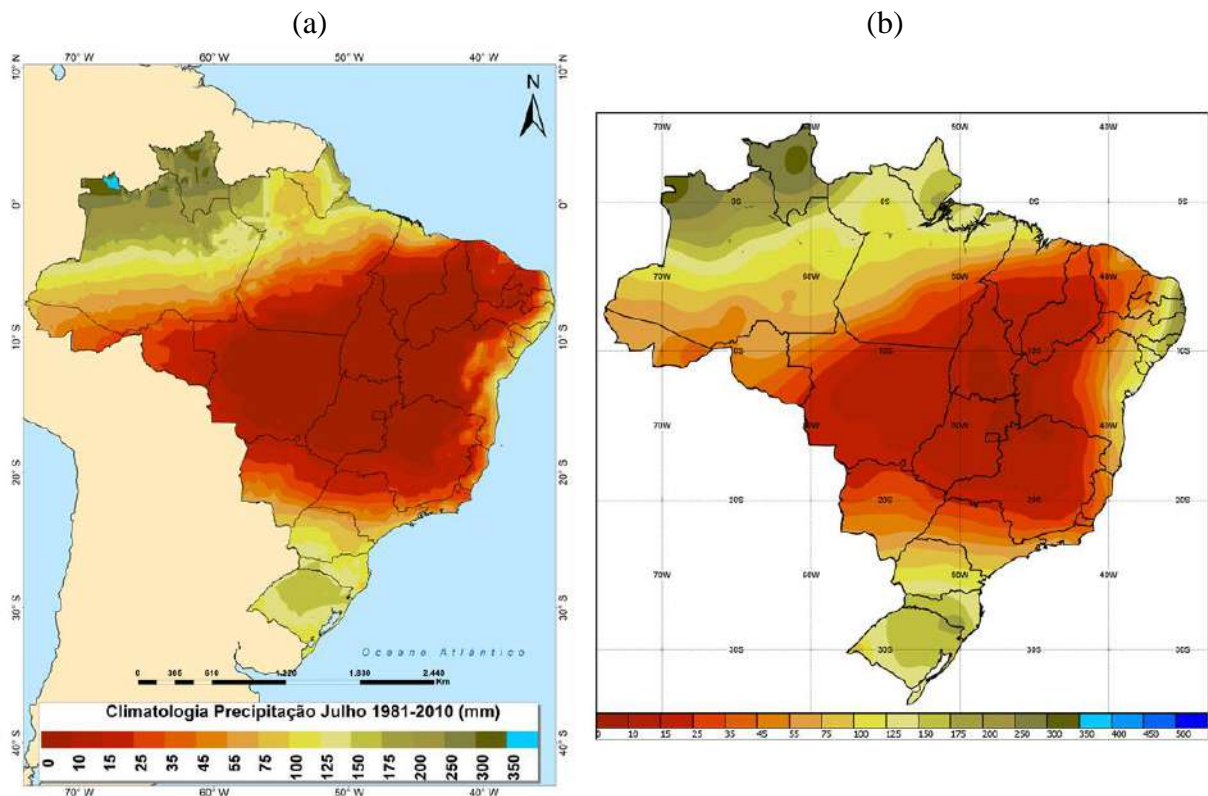


Figura 4.3 – Climatologia da precipitação acumulada do mês de julho (mm/mês) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.

4.2 Temperaturas Mínima e Máxima

Para avaliar a representação da climatologia de TN e TX no Brasil pela reanálise ERA5 foram elaborados os campos nos meses de janeiro e julho por serem os meses onde ocorrem, climatologicamente, os maiores e os menores valores respectivamente de temperatura em grande parte do país.

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam a climatologia da temperatura mínima (°C) dos meses de janeiro e de julho no Brasil no período de 1981 a 2010, respectivamente. Nas Figuras 4.4a e 4.5a,

a climatologia foi construída por meio dos dados da reanálise ERA5. As Figuras 4.4b e 4.5b apresentam a climatologia do INMET no mesmo período.

Comparando-se as Figuras 4.4a e 4.4b, nota-se que a reanálise ERA5 representa satisfatoriamente a climatologia da temperatura mínima no mês de janeiro no país, posicionando bem as entradas de ar mais frio, desde a Região Sul, em direção às Regiões Sudeste e sul do Centro-Oeste e Nordeste. Os máximos no oeste do Mato Grosso do Sul e em pontos isolados no norte das Regiões Norte e Nordeste também são bem representados. Entretanto, é possível notar que há alguns locais onde a temperatura mínima é levemente subestimada pela reanálise, como no estado do Amapá, e superestimada em parte da faixa oeste da Região Sul do país.

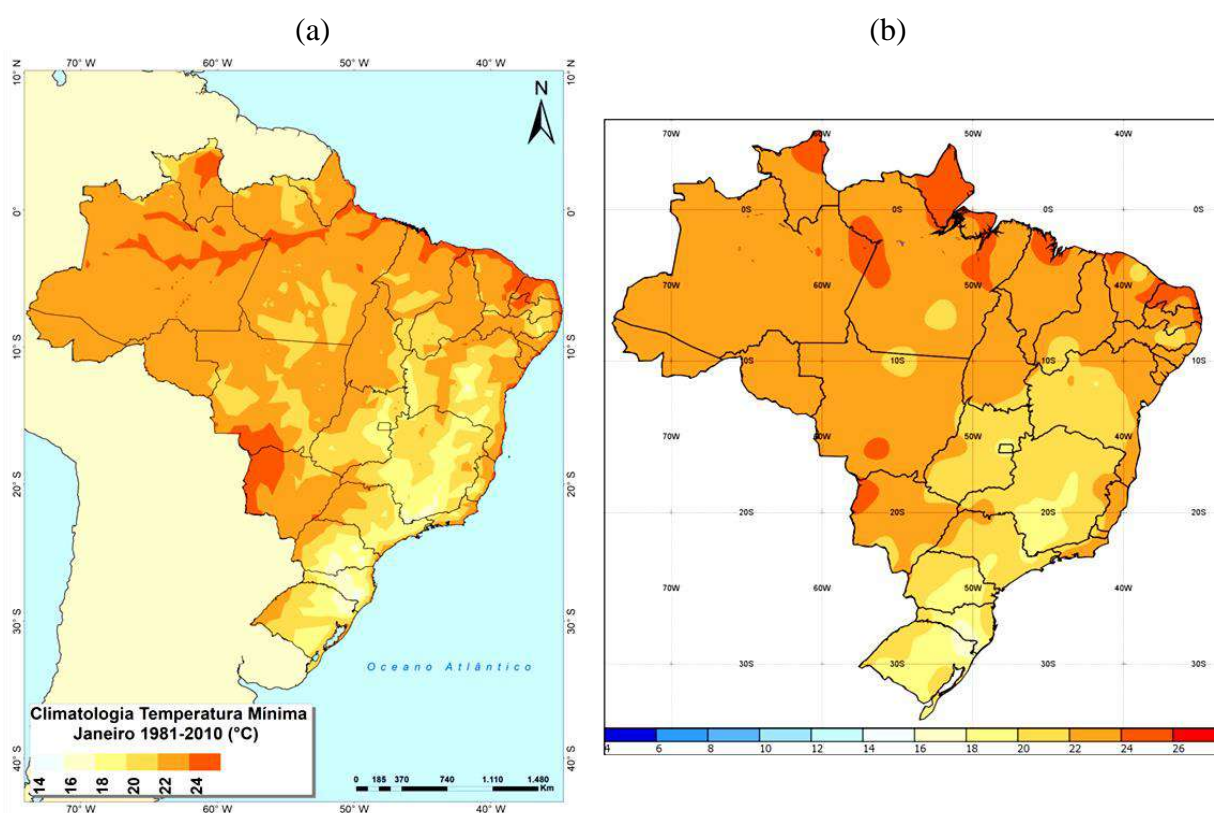


Figura 4.4 – Climatologia da temperatura mínima do mês de janeiro (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.

Na Figura 4.5, observa-se também uma boa representação da climatologia da temperatura mínima no mês de julho pela reanálise ERA5. A reanálise identifica os valores mínimos que ocorrem na Região Sul e o padrão típico de entrada de massas de ar frio pelo interior da Região Sudeste e parte do Centro-Oeste no inverno. Contudo, vale ressaltar que a reanálise superestima ligeiramente os valores de temperatura mínima do ar no mês de julho no sul da Amazônia, onde é comum o fenômeno da friagem nessa época do ano. Observa-se também que apesar de

identificar menores valores de temperatura mínima no Centro-Oeste em julho, o ERA5 também superestima os valores nessa região, sobretudo no estado de Mato Grosso.

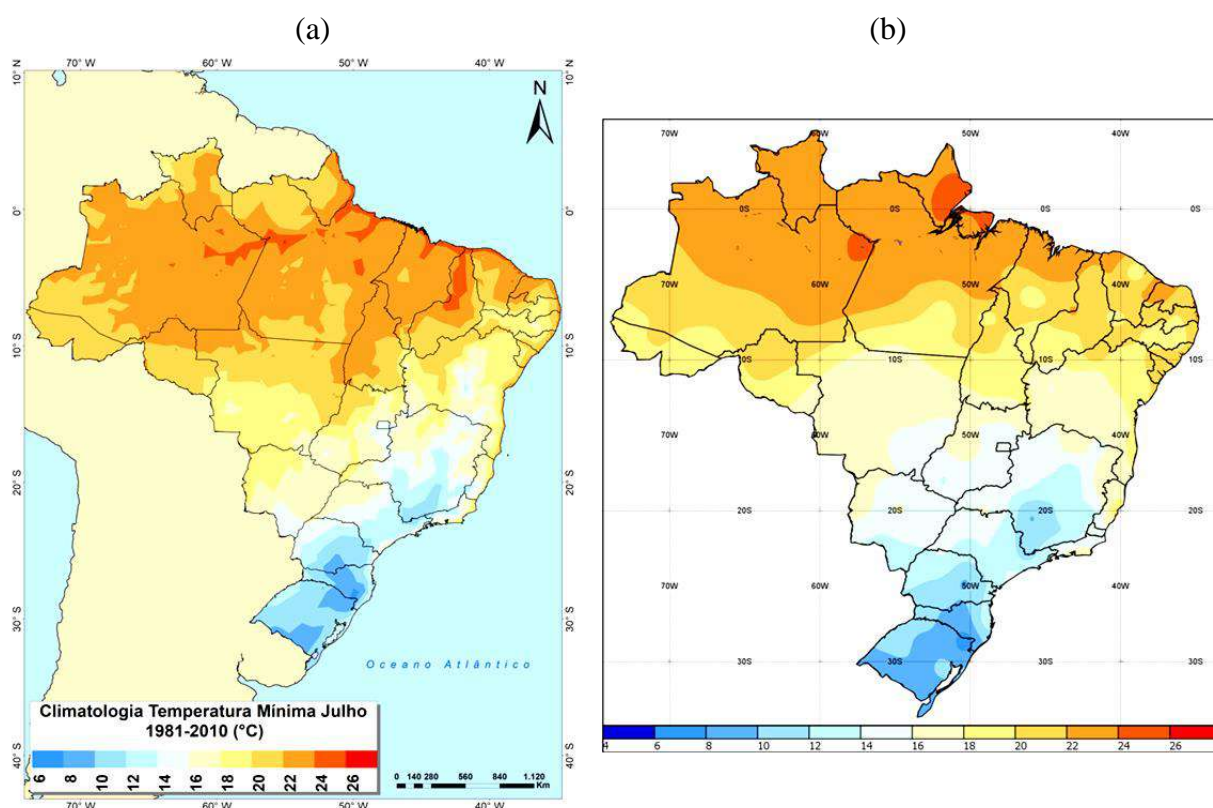


Figura 4.5 – Climatologia da temperatura mínima do mês de julho (°C) no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a climatologia da temperatura máxima (°C) dos meses de janeiro e de julho no Brasil no período de 1981 a 2010, respectivamente. Nas Figuras 4.6a e 4.7a a climatologia foi construída com os dados da reanálise ERA5. As Figuras 4.6b e 4.7b apresentam a climatologia do INMET no mesmo período.

Comparando-se as Figuras 4.6a e 4.6b, verifica-se que a reanálise ERA5 subestima a temperatura máxima ao longo de todo o Brasil no mês de janeiro, apesar de identificar o padrão de menores valores nas regiões de topografia elevada das Regiões Sul e Sudeste. A reanálise consegue identificar também um padrão de maiores valores de temperatura máxima em janeiro no Nordeste. A subestimativa da reanálise ERA5 para a temperatura máxima nessa época do ano parece um erro sistemático devido a alguma deficiência na simulação, uma vez que a distribuição espacial da variável é relativamente bem simbolizada.

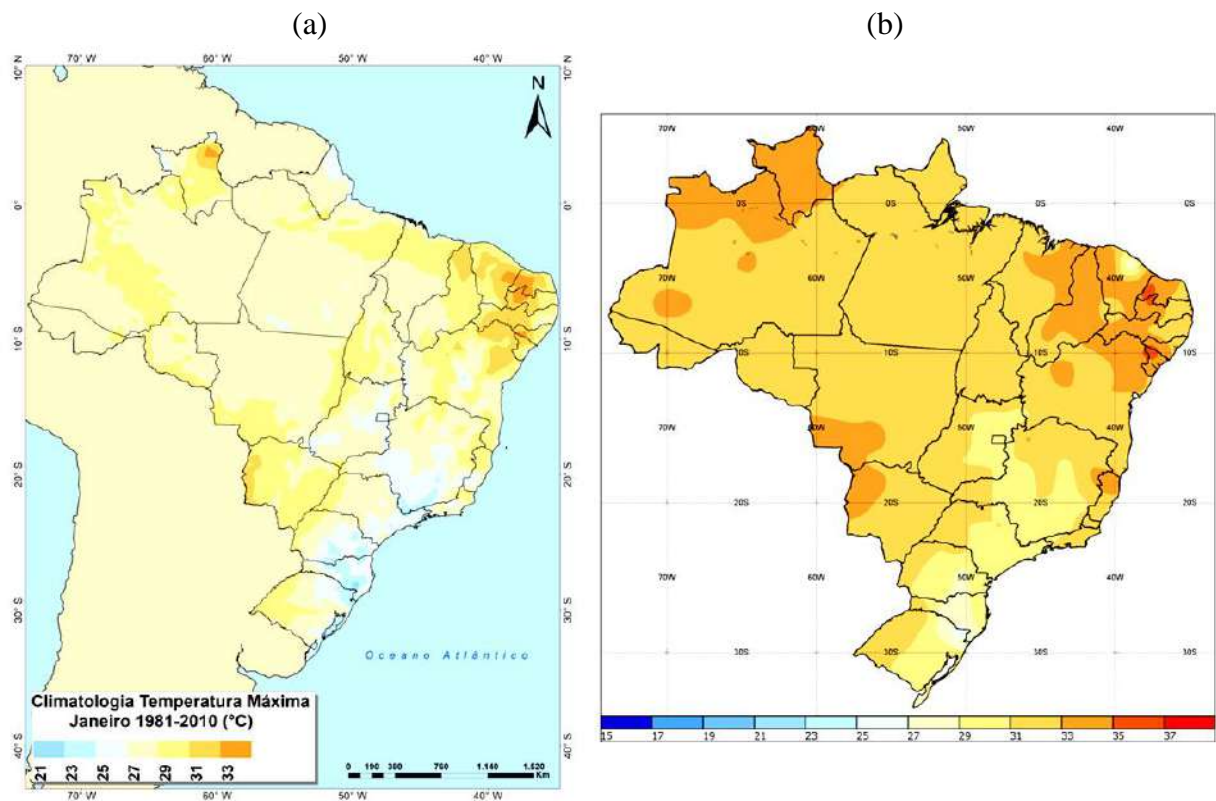


Figura 4.6 – Climatologia da temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) do mês de janeiro no Brasil no período de 1981 a 2010. Em (a) reanálise ERA5 e (b) Normal Climatológica do INMET.

Analisando a Figura 4.7, nota-se que a reanálise ERA5 subestima a temperatura máxima também no mês de julho ao longo de todo o Brasil. Entretanto, mais uma vez, ressalta-se que a reanálise identifica os principais padrões climatológicos de temperatura máxima de um mês de inverno, ou seja, valores reduzidos nas regiões Sul e Sudeste do Brasil em função da incursão de frentes frias, e valores elevados em parte das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste em virtude da ausência de nebulosidade característica dessa época do ano. É interessante ressaltar que em grande parte das Regiões Norte e Centro-Oeste, a reduzida nebulosidade no inverno promove temperaturas máximas mais elevadas nessa estação do que no verão (comparar Figuras 4.6b e 4.7b) e esse detalhe é corretamente representado pela reanálise ERA5 (comparar Figuras 4.6a e 4.7a). Nas Reanálises ERA-Interim e CFSR tal aspecto não é capturado (Dereczynski, comunicação pessoal).

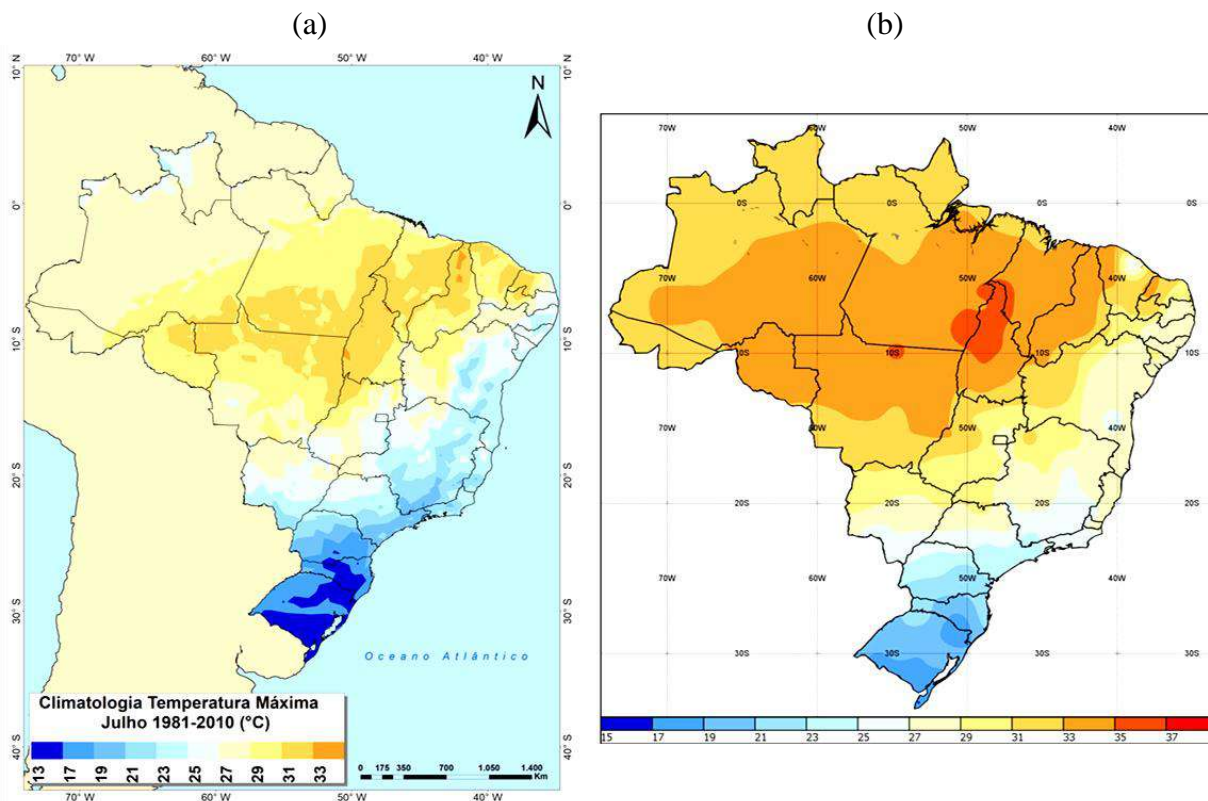


Figura 4.7 – Climatologia da temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) do mês de julho no Brasil no período de 1981 a 2010 representada pela (a) reanálise ERA5 e pela (b) Normal Climatológica do INMET.

Em suma, a reanálise ERA5 representa bem a variabilidade espacial da climatologia da precipitação e da temperatura do ar no Brasil, identificando regiões onde ocorrem máximos e mínimos dessas variáveis. Contudo, há subestimativas e superestimativas pontuais dos valores de precipitação e de temperatura mínima e subestimativa generalizada dos valores de temperatura máxima. Essa análise mostra a relevância da investigação da climatologia de uma reanálise antes de se trabalhar diretamente com seus dados, principalmente a nível regional, onde pode haver discrepâncias dessas simulações em relação às informações observadas.

CAPÍTULO V

TENDÊNCIAS OBSERVADAS EM EXTREMOS CLIMÁTICOS

Neste capítulo são apresentadas as tendências de extremos climáticos calculadas a partir dos dados de precipitação e de temperaturas mínima e máxima da reanálise ERA5 entre os anos de 1981 e 2018. Os resultados são confrontados com as tendências de extremos climáticos calculadas por Regoto (2020) a partir de dados observacionais de estações pluviométricas do INMET e da ANA no Brasil entre 1961 e 2018.

5.1 Tendências de Precipitação

Nesta seção são apresentadas as tendências nos extremos climáticos associados à precipitação (PRCPTOT, RX5day, R30mm, R95p, R99p, CWD e CDD) sobre o Brasil (Figuras 5.1 a 5.7).

A Figura 5.1 apresenta as tendências nos acumulados pluviométricos anuais (PRCPTOT [mm/década]). Na Figura 5.1a, a tendência foi calculada através dos dados da reanálise ERA5, enquanto a Figura 5.1b foi elaborada por Regoto (2020) através de dados observacionais de estações pluviométricas no Brasil. De uma forma geral, a reanálise ERA5 apresenta diminuição de PRCPTOT na maior parte do país.

Analizando as Figuras 5.1a e 5.1b, nota-se que a reanálise ERA5, quando comparada com os dados observacionais, indica decréscimo de PRCPTOT entre -50 e -150 mm/década em parte das regiões Nordeste, Sudeste, Centro-oeste e no leste da região Norte. Esse padrão concorda especialmente com as tendências detectadas de redução dos totais pluviométricos anuais na porção central do Brasil, além de grande parte da região Nordeste. Observa-se também, por parte do ERA5, um aumento de PRCPTOT nos extremos norte, oeste e sul da Amazônia, e uma diminuição em parte dos estados do Amazonas e do Pará. Essa heterogeneidade nos sinais de tendências dos volumes de chuva no Norte do território também foi identificada por Regoto (2020). Entretanto, na região Sul, em parte do Sudeste e no Mato Grosso do Sul, a reanálise ERA5 possui um sinal oposto ao observado, indicando tendências de decréscimo de PRCPTOT, enquanto que os dados registrados indicam tendências de elevação.

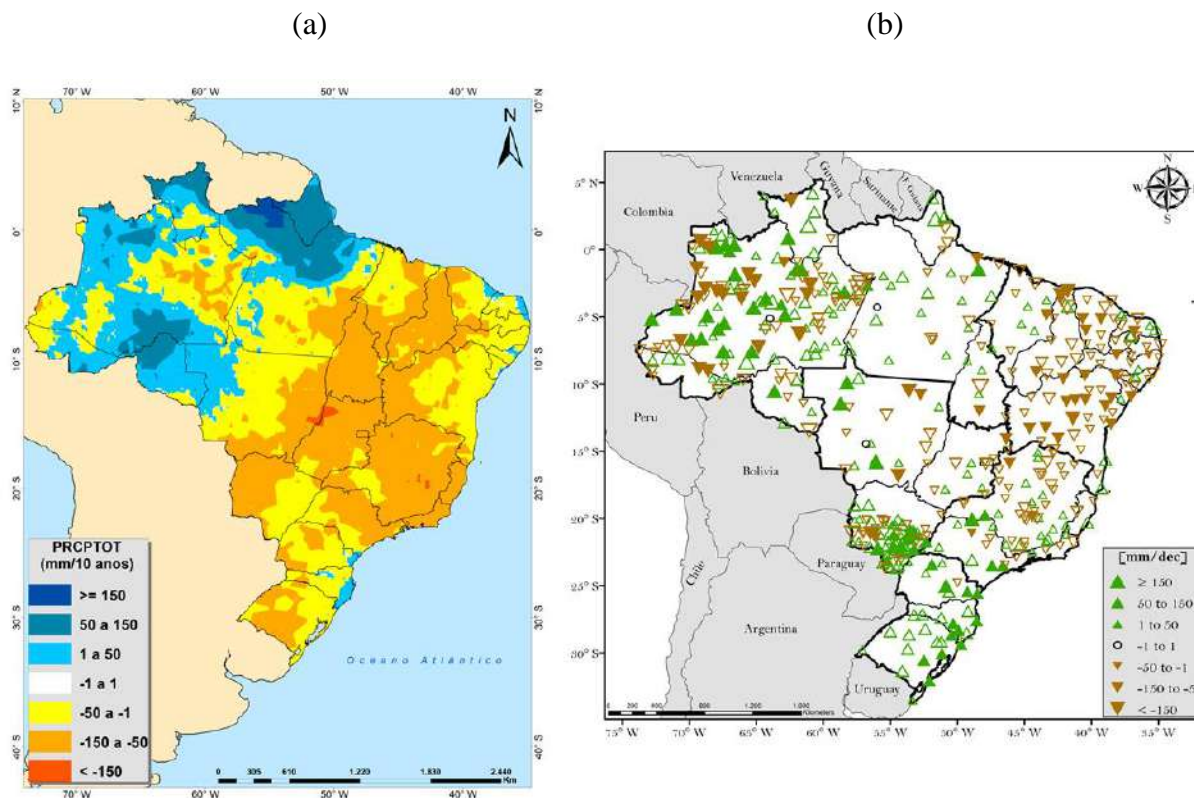


Figura 5.1 – Tendências do indicador PRCPTOT (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

A Figura 5.2 apresenta as tendências detectadas em relação ao indicador RX5day (precipitação máxima em 5 dias consecutivos). Comparando-se o ERA5 com os dados observacionais, verifica-se que a reanálise também identifica tendência de aumento de RX5day na maior parte da região Norte e em partes do Centro-Oeste em até 10 mm/década. Na região Sudeste, a reanálise ERA5 indica tanto padrões de tendência de aumento quanto de diminuição do RX5day, assim como nos dados observacionais. No Nordeste, a reanálise identifica tendência de aumento do índice por uma área maior desde o leste do Ceará até a Paraíba. Entretanto, apesar da reanálise ERA5 também indicar tendência de elevação em pequenos trechos do Rio Grande do Sul e do litoral de Santa Catarina, o sinal na região Sul, de uma maneira geral, é oposto ao que é indicado pelos dados observados.

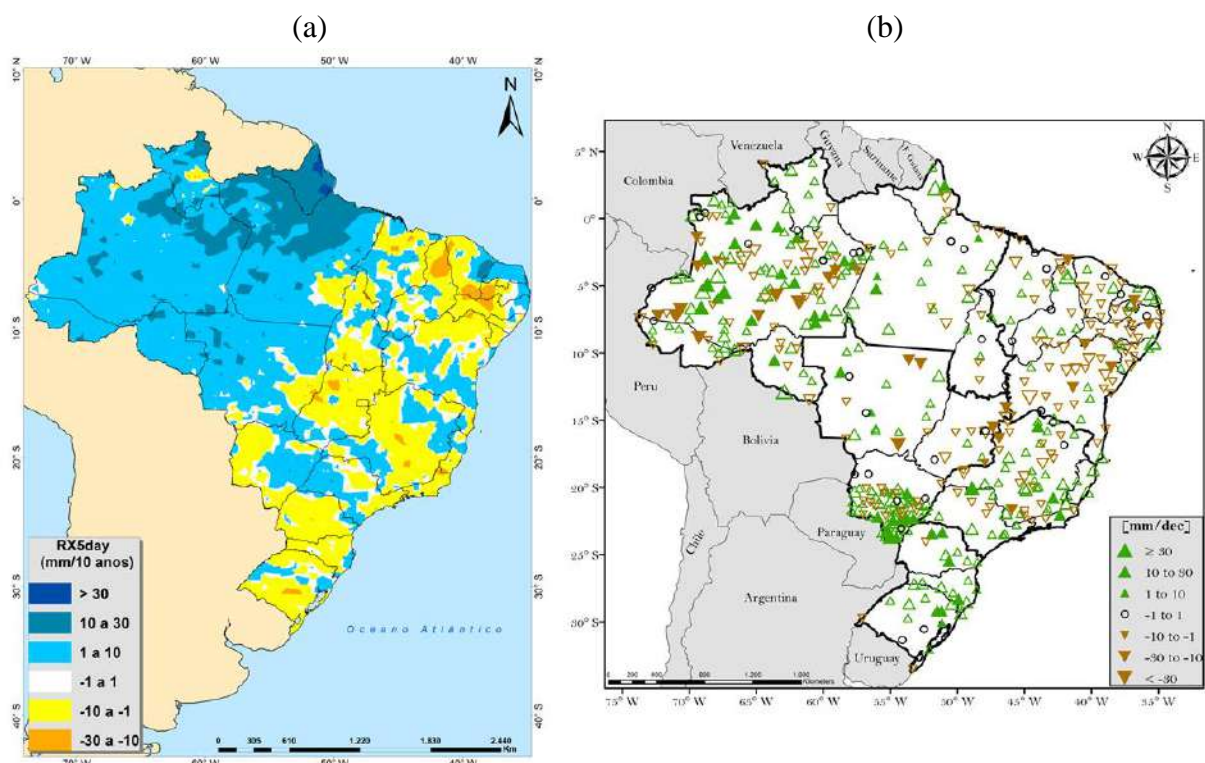


Figura 5.2 – Tendências do indicador RX5day (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

As tendências relacionadas ao indicador R30mm (dias de chuva muito forte)) são mostradas na Figura 5.3. Ao comparar a reanálise ERA5 com os dados observacionais, observa-se que a reanálise também identifica uma tendência de aumento do R30mm na Região Norte e em parte do Centro-Oeste e uma inversão do sinal da tendência na região Sul e em Mato Grosso do Sul. Somente no estado de Santa Catarina, o sinal de elevação de R30mm é capturado de modo semelhante ao observado. Já no Nordeste, a reanálise ERA5 não identifica tendências na maior parte da região, enquanto os dados observacionais indicam tendência de diminuição de R30mm, assim como em outras estações não há tendência. Na região Sudeste, a reanálise aponta uma diminuição de R30mm enquanto os dados observacionais possuem poucas estações com tendências estatisticamente significativas.

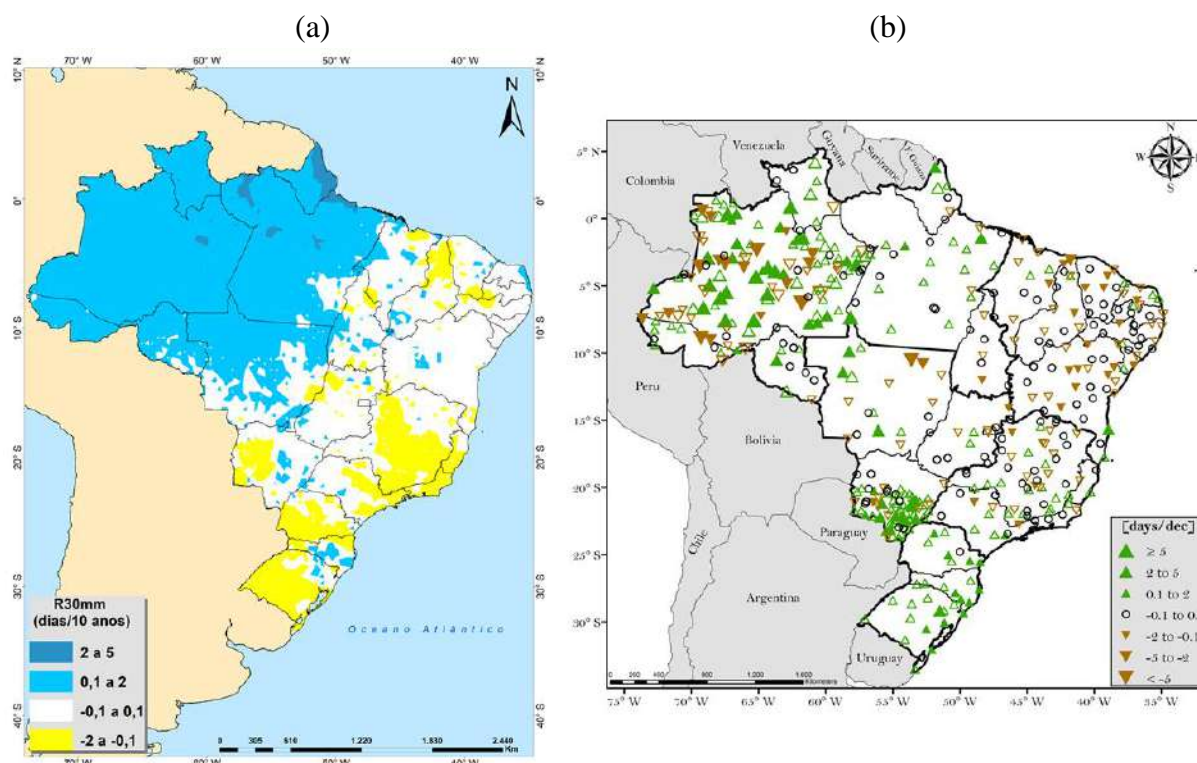


Figura 5.3 – Tendências do indicador R30mm (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

A Figura 5.4 exibe as tendências associadas ao indicador R95p (chuvas intensas). Nota-se que a reanálise ERA5, quando comparada aos dados observacionais, também observa uma tendência de aumento do R95p em parte da Região Norte. Entretanto, em parte do litoral do Nordeste, as tendências são opostas, ou seja, aumento pelo ERA5 e decréscimo pelos dados observados. Esse panorama de sinais invertidos acontece também na Região Sul do Brasil. Na Região Sudeste, a reanálise ERA5 indica uma tendência predominante de diminuição de R95p enquanto os dados observacionais possuem muitos postos com sinal de elevação.

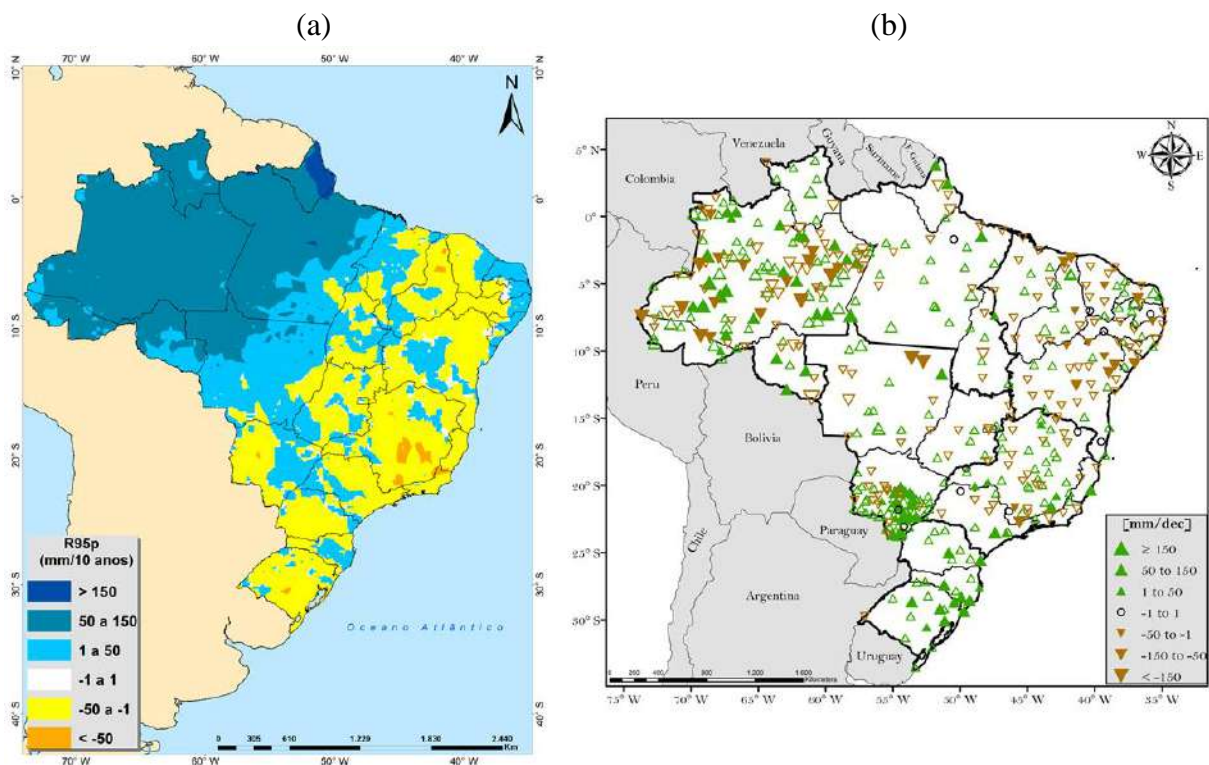


Figura 5.4 – Tendências do indicador R95p (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

As tendências em relação ao indicador R99p (dias extremamente chuvosos) são apresentadas na Figura 5.5. Comparando-se a reanálise ERA5 com os dados observacionais, é possível verificar que a reanálise continua indicando sinais dessemelhantes na maior parte da Região Sul, com exceção apenas por conta de Santa Catarina. No Norte, o ERA5 aponta para uma tendência de aumento em praticamente toda a região, enquanto os dados observacionais não indicam um sinal único para a tendência do R99p. A reanálise ERA5 acusa com maior clareza a ausência de tendências na maior parte da região Nordeste.

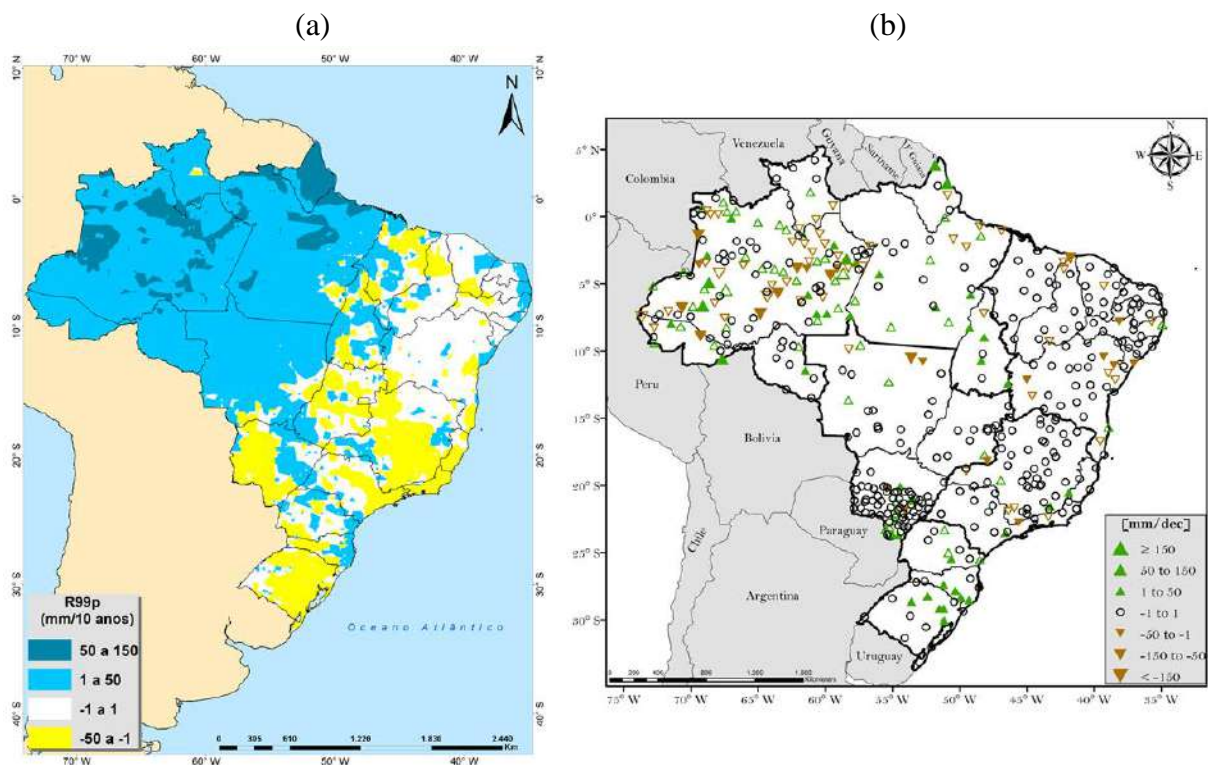


Figura 5.5 – Tendências do indicador R99p (mm/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

Analisando as tendências dos dias chuvosos consecutivos (CWD) na Figura 5.6, nota-se que as tendências encontradas pela reanálise ERA5 coincidem com os dados observacionais em parte da Região Norte, principalmente no estado do Amazonas, onde há tendência observada significativa de diminuição do CWD. Já na Região Sul, apesar dos dados observacionais apontarem uma ausência de tendência do indicador, a reanálise apresenta tendência de aumento no leste do Paraná e Santa Catarina e tendência de diminuição no oeste da região e no estado do Rio Grande do Sul. No setor norte do estado do Pará, a reanálise encontra uma acentuada tendência de aumento do CWD (acima de 2 dias/década), porém essa tendência não é revelada pelos dados observados. Na maior parte do Brasil, onde não há uma tendência definida do CWD pelos dados observacionais, a reanálise ERA5 indica diminuição dos dias chuvosos consecutivos superior a 2 dias/década, incluindo grande parte das Regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste.

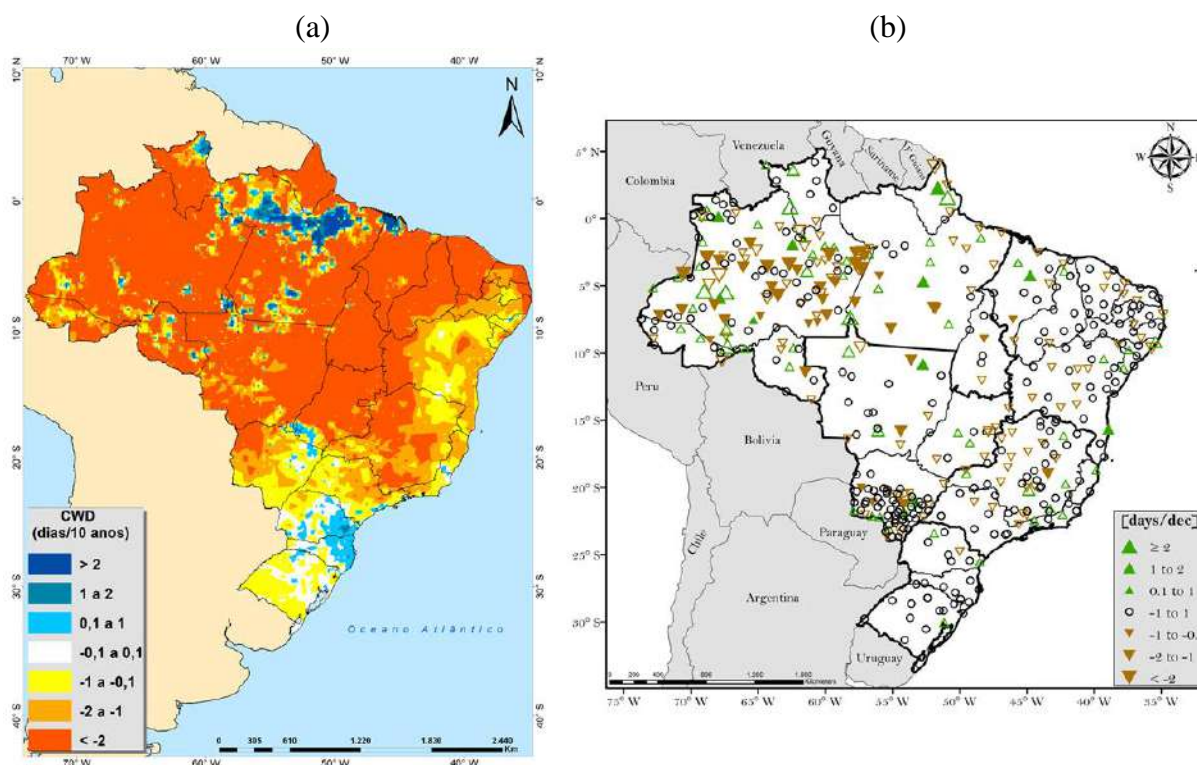


Figura 5.6 – Tendências do indicador CWD (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

A Figura 5.7 evidencia as tendências relacionadas ao indicador de dias secos consecutivos (CDD) no Brasil. É possível verificar que a reanálise ERA5 apresenta tendência de aumento do CDD, de uma maneira geral, na maior parte da porção centro-norte do país, assim como os resultados encontrados na maior parte das estações pluviométricas. Além disso, a reanálise ERA5 e os dados observacionais também coincidem na ausência de tendência sobre a Região Sul do país e no norte do Amazonas, além do aumento mais expressivo sobre o Noroeste de Minas Gerais e na tendência de diminuição do CDD no leste de Roraima. Contudo, em parte do sertão Nordestino, o sinal encontrado pela reanálise ERA5 é ligeiramente oposto ao encontrado pelos dados observacionais, indicando uma tendência de redução dos dias secos consecutivos, quando na realidade prevalece uma elevação. Sendo assim, de um modo geral, o CDD é o indicador de precipitação com a tendência melhor representada pela reanálise ERA5 neste estudo.

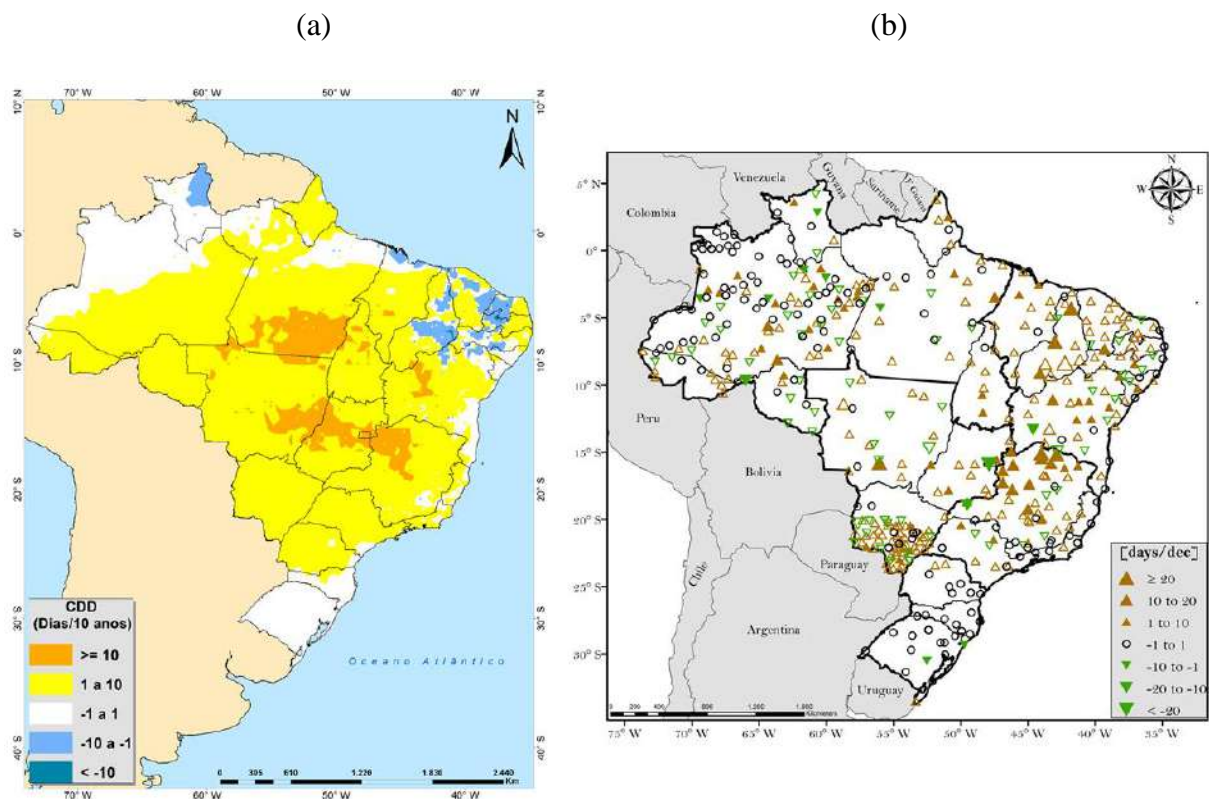


Figura 5.7 – Tendências do indicador CDD (dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados pluviométricos observacionais no período 1961-2018 (Fonte: Regoto, 2020).

Em suma, para os indicadores de extremos de precipitação, a reanálise ERA5 detecta o os mesmos sinais na maioria das regiões do país. Entretanto, para a Região Sul, a reanálise mostrou-se não ser uma boa ferramenta para estudar tendências de extremos de precipitação, obtendo resultados diferentes dos dados observacionais em todos os índices analisados. Contudo, cabe destacar que nesta pesquisa não foram consideradas as significâncias estatísticas das tendências do ERA5. Logo, mesmo sem a representatividade adequada das tendências por parte da reanálise, vale destacar que os padrões gerais estatisticamente significativos são os mais importantes de serem simbolizados.

Na região Norte, a reanálise também encontra um padrão heterogêneo nas tendências de extremos de precipitação, indicando, assim como os dados observacionais, que na parte leste há uma tendência de diminuição dos dias chuvosos, conforme encontrado também por ALMEIDA et al. (2017). Além disso, a reanálise ERA5 também apresenta um aumento de chuvas extremas na região Norte.

No Nordeste, a reanálise ERA5 não detecta o mesmo sinal claro encontrado pelos dados observacionais de que o clima está se tornando mais seco na região. Contudo, as tendências de redução das chuvas ou ausência de tendências também foram detectadas em parte pela reanálise.

Na região Centro-Oeste, não é detectado pela reanálise ERA5 a tendência de clima mais úmido e com chuvas mais fortes na porção sul da região. Já no Sudeste, a reanálise ERA5 apresenta a maioria dos indicadores com predominância de tendências de um clima mais seco na região, enquanto não há um sinal único da tendência dos extremos de precipitação pelos dados observacionais, sendo apresentados resultados heterogêneos.

5.2 Tendências de Temperatura

Nesta seção são apresentadas as tendências de extremos climáticos relacionados à temperatura do ar (TX90p, TN90p, TX10p, TN10p, TXx, TNx, TXn, TNn) sobre o Brasil (Figuras 5.8 a 5.15).

A Figura 5.8 apresenta as tendências associadas ao indicador de dias quentes (TX90p). Na Figura 5.8a, a tendência foi calculada através dos dados da reanálise ERA5, enquanto a Figura 5.8b foi elaborada por Regoto (2020) através de dados observacionais de estações meteorológicas do INMET no Brasil.

Assim como observado com os dados das estações meteorológicas, a reanálise ERA5 também apresenta um aumento dos dias quentes por quase todo o Brasil, sendo na maior parte do território um aumento entre 2 e 5% dias/década. Entretanto, no interior dos estados da Paraíba, Pernambuco e Alagoas, a reanálise encontra um sinal oposto aos dados observacionais, indicando uma tendência de diminuição dos dias quentes.

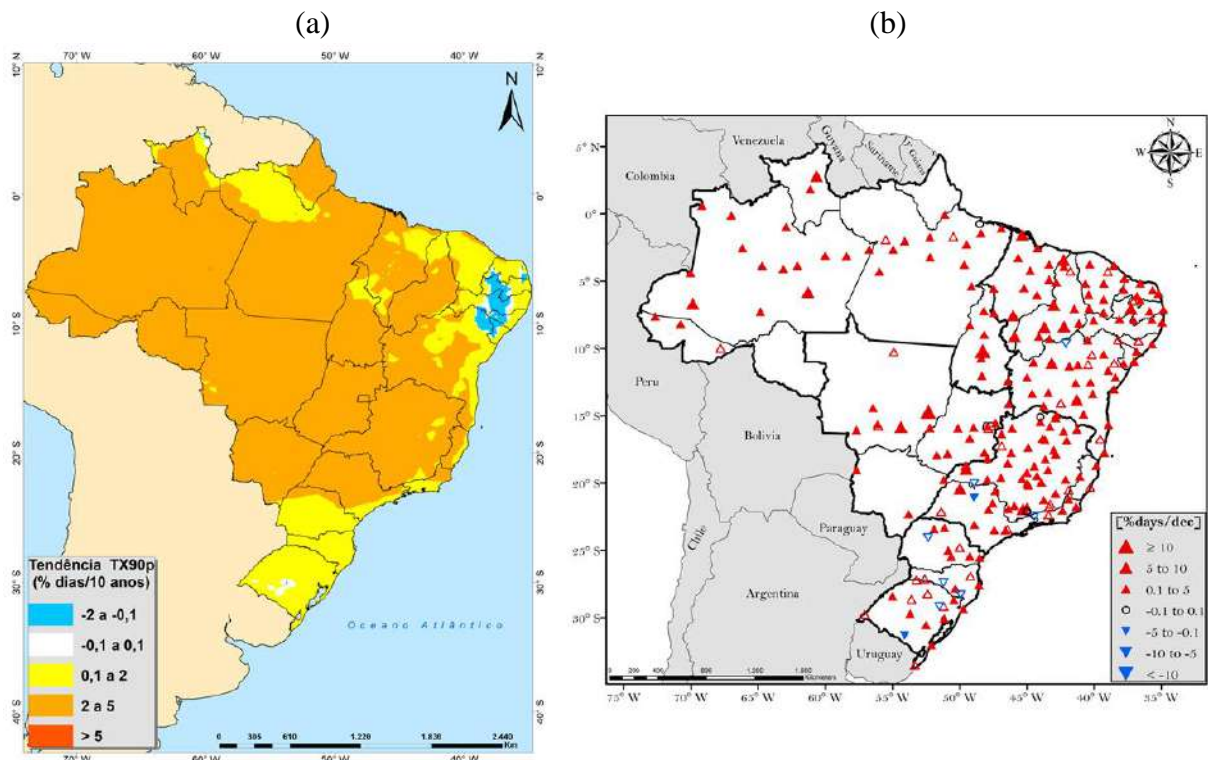


Figura 5.8 – Tendências do indicador TX90p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).

Na Figura 5.9 é possível notar que a reanálise ERA5 também indica um aumento das noites quentes no Brasil (TN90p), apresentando um aumento generalizado entre 2 e 5% dias/década. Esse aumento coincide com o que é observado em grande parte das estações meteorológicas. Entretanto, pontualmente há locais onde os dados observacionais indicam uma tendência de diminuição das noites quentes.

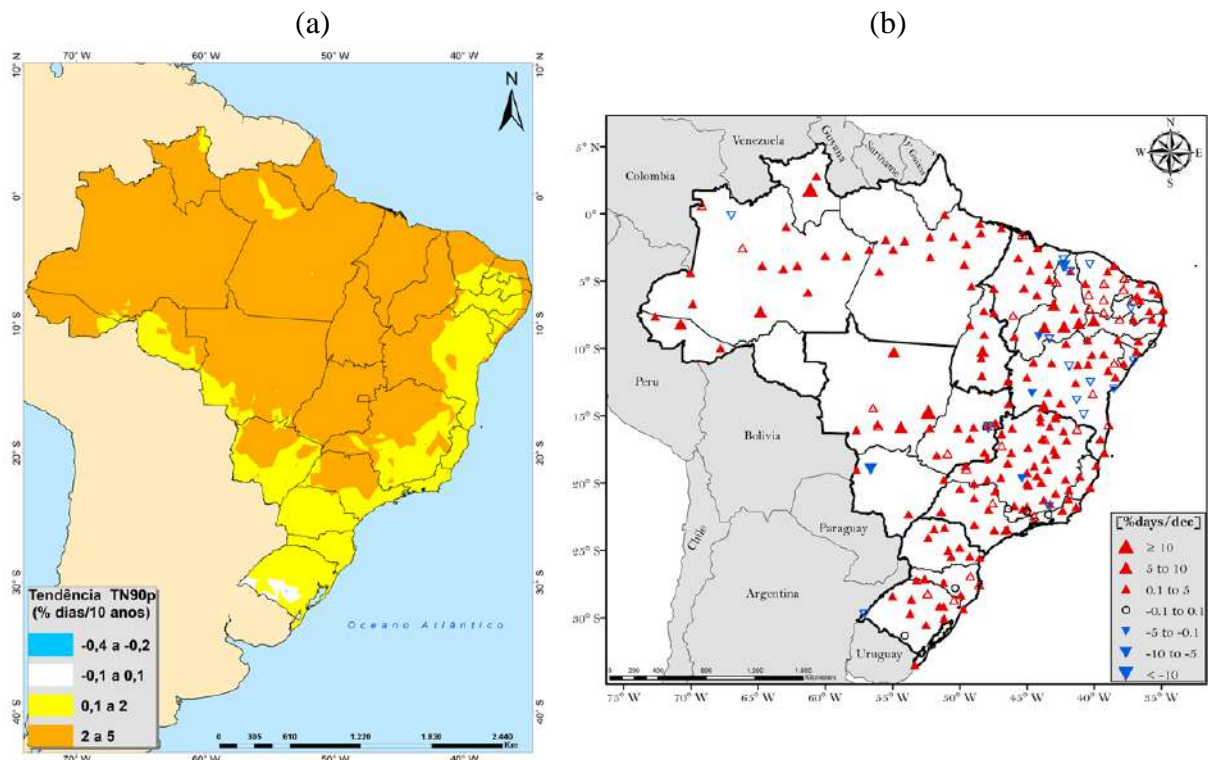


Figura 5.9 – Tendências do indicador TN90p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados observacionais no período 1961-2017 (Regoto, 2020).

A Figura 5.10 mostra as tendências em relação aos dias frios (TX10p) sobre o Brasil. Destaca-se que a reanálise ERA5 indica uma redução dos dias frios em quase todo o país entre -0,1 e -5% dias/década, assim como o que foi observado com os dados das estações meteorológicas. Entretanto, em alguns pontos, a magnitude das tendências detectadas pelo ERA5 é subestimada em relação aos dados observados, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil.

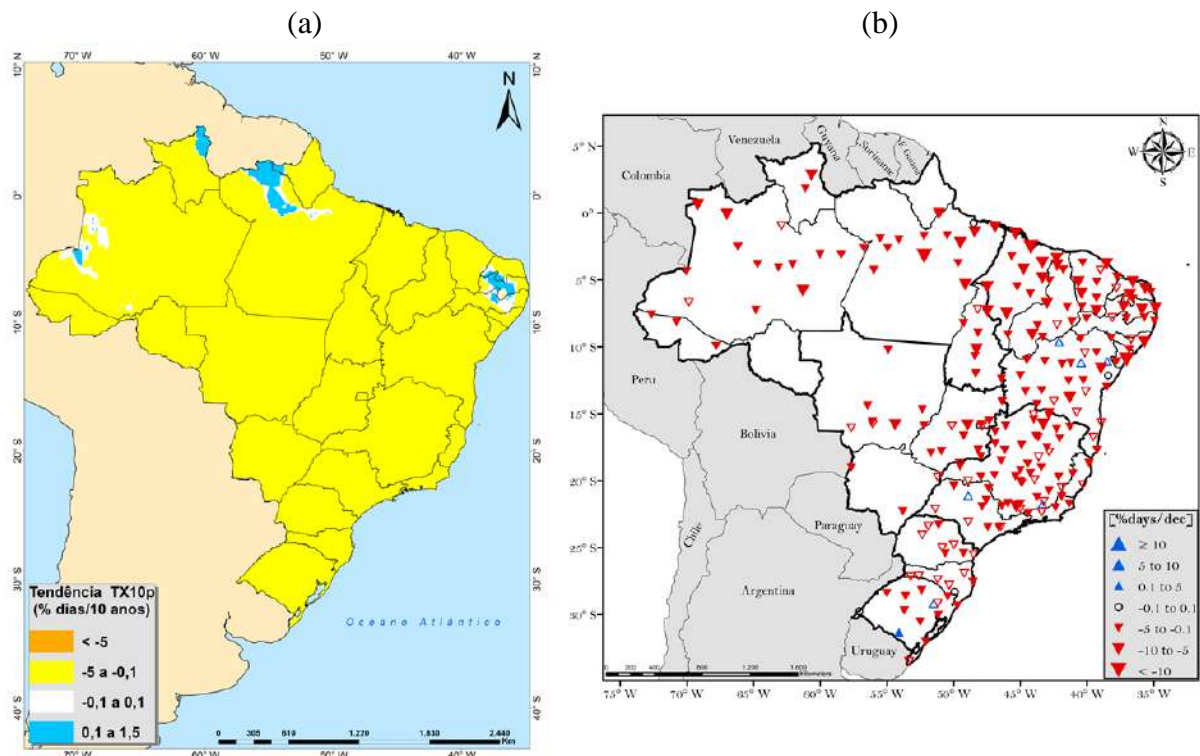


Figura 5.10 – Tendências do indicador TX10p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados observacionais no período 1961-2017 (Regoto, 2020).

Avaliando as tendências das noites frias (TN10p – Figura 2.11), nota-se que a reanálise ERA5, quando comparada aos dados observacionais, também aponta uma redução generalizada das noites frias no Brasil em até -5% dias/década. Contudo, pontualmente, os dados observacionais indicam um aumento do TN10p em estações da Bahia, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, tendências essas não encontradas pela reanálise ERA5. A magnitude das tendências de decréscimo das noites frias também é bem representada pelo ERA5, com maiores valores na porção centro-norte do Brasil. A redução de noites frias no Brasil coincide com a redução de dias frios (Figura 5.10) e aumento das noites (Figura 5.9) e dias quentes (Figura 5.8) na maior parte do país, resultado encontrado tanto pelos dados da reanálise ERA5 quanto pelos dados observacionais.

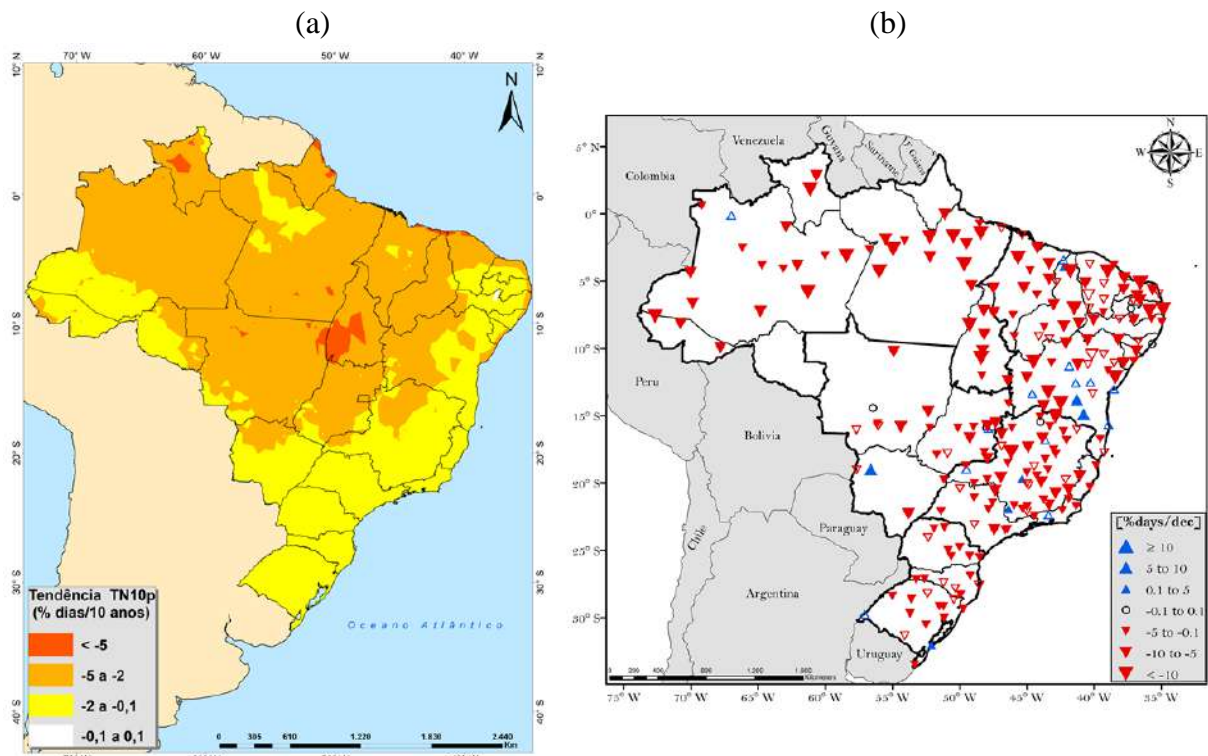


Figura 5.11 – Tendências do indicador TN10p (%dias/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).

Na Figura 5.12, a reanálise ERA5 também indica um aumento generalizado da maior temperatura máxima diária (TXx), quando comparada aos dados observacionais. O aumento de até 1,5°C/década nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte é bem representado. Entretanto, no sul do Rio Grande do Sul e no interior do Nordeste a reanálise apresenta uma diminuição de até -0,5°C/década, quando os dados observacionais prevalecem com aumento.

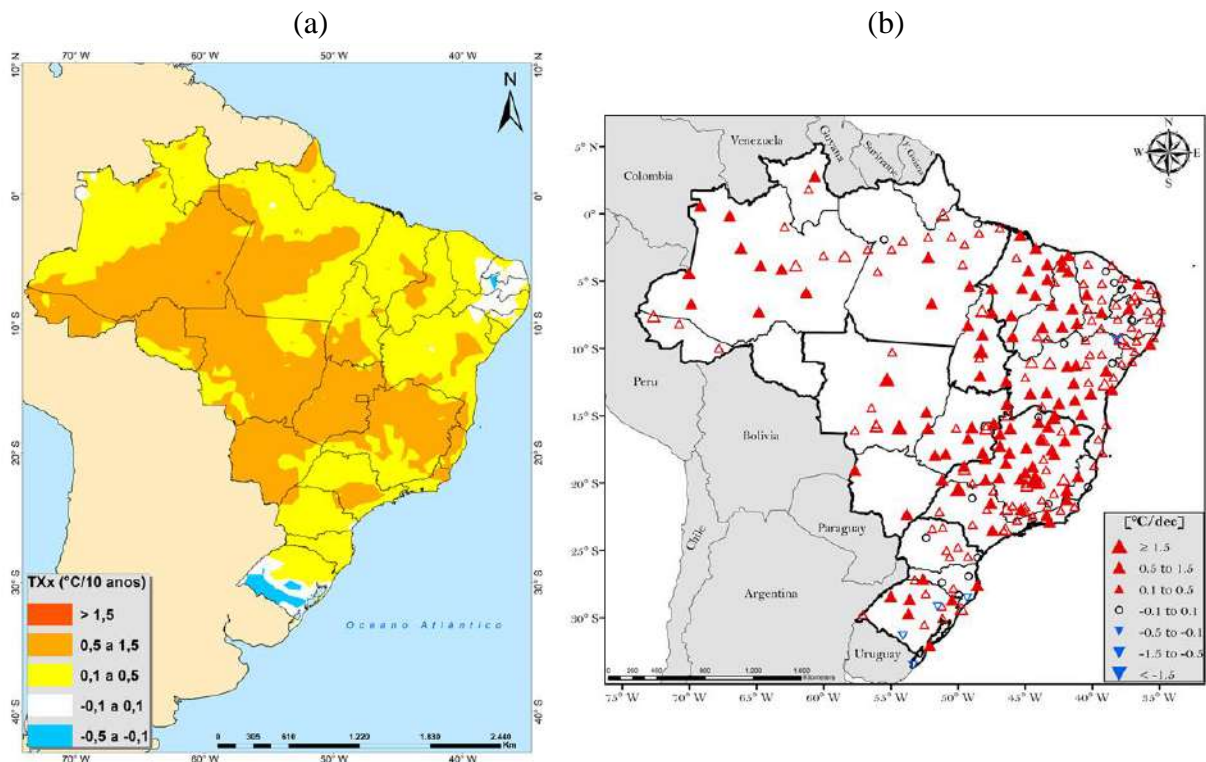


Figura 5.12 – Tendências do indicador TXx (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências elaboradas com dados observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).

A Figura 5.13 apresenta as tendências associadas à maior temperatura mínima diária (TNx). Nota-se que a reanálise ERA5 indica também um aumento generalizado de TNx, contudo a intensidade deste aumento possui subestimativa de até 1°C/década no setor central do Brasil. No sul do Rio Grande do Sul, a reanálise indica ausência de tendência, assim como nos dados observados.

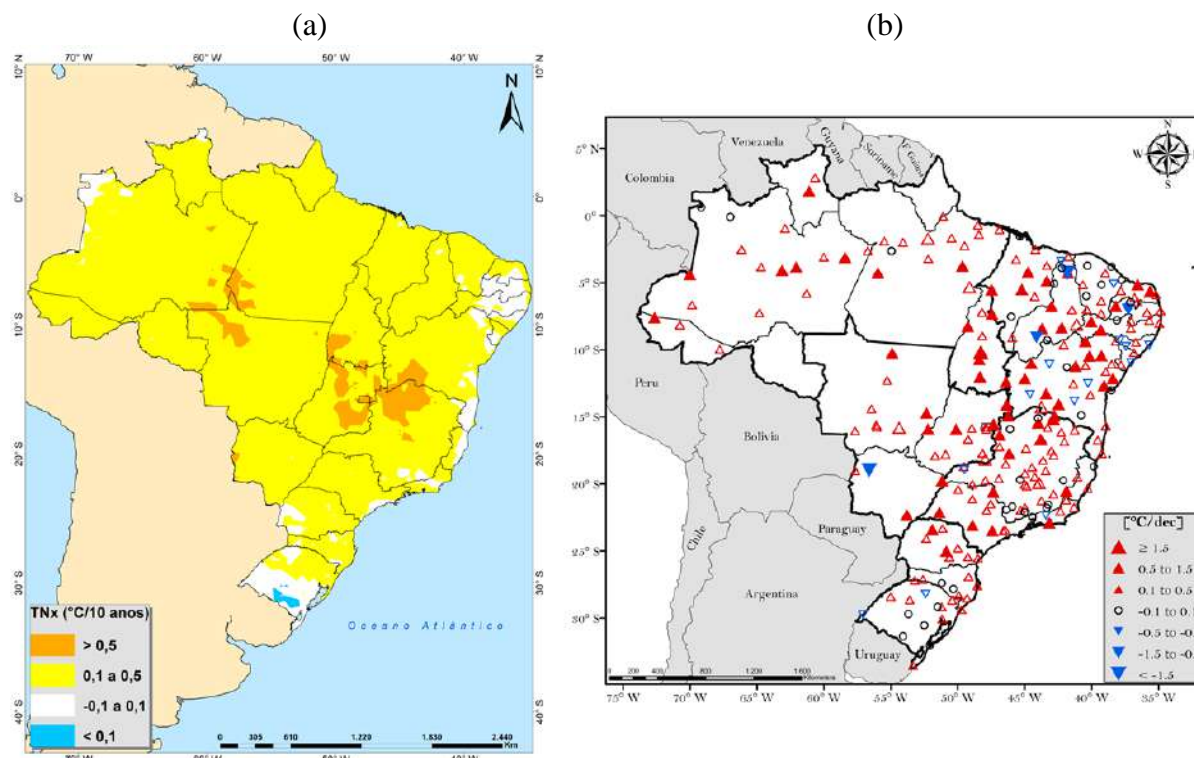


Figura 5.13 – Tendências do indicador TNx (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências calculadas com dados observacionais no período 1961-2017 (Fonte: Regoto, 2020).

Na Figura 5.14, a reanálise ERA5 identifica o aumento mais expressivo da menor temperatura máxima diária (TXn) sobre parte das regiões Sudeste e Centro-Oeste, contudo essa elevação possui subestimativa de até 1°C quando comparado com os dados observacionais. Já sobre a porção norte da Região Nordeste e norte de Roraima a reanálise identifica uma diminuição de TXn, enquanto os dados observacionais indicam o oposto. No geral, a reanálise ERA5 apresenta um crescimento da menor temperatura máxima diária na maior parte do Brasil.

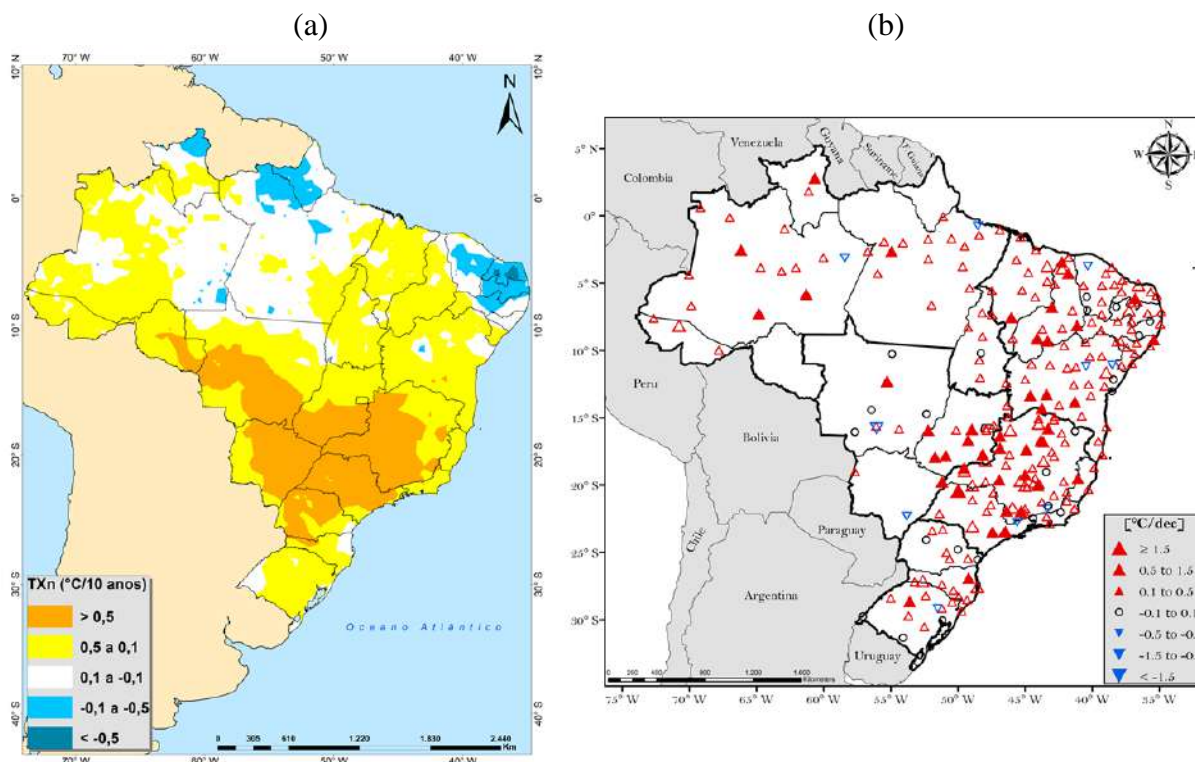


Figura 5.14 – Tendências do indicador TXn (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências calculadas com dados observacionais no período 1961-2017 (Regoto, 2020).

A menor temperatura mínima diária (TNn) também é representada pela reanálise ERA5 (Figura 5.15) com um aumento na maior parte do Brasil, assim como indicado pelos dados observacionais. Entretanto, a reanálise ERA5 apresenta tendência de diminuição de TNn no Rio Grande do Sul, no sul do Maranhão e norte de Tocantins, enquanto que os dados observacionais indicam ausência de tendência ou uma tendência de aumento nessas áreas. Os maiores valores de elevação de TNn nas Regiões Nordeste e Sudeste não foram simbolizados de maneira evidente pelo ERA5, mas ainda assim predomina o sinal de aumento do indicador. Além disso, a reanálise ERA5 apresenta uma tendência de aumento mais intensa, quando comparada aos dados observacionais, em uma área que vai desde o oeste da Região Centro-Oeste até o sul da Região Norte.

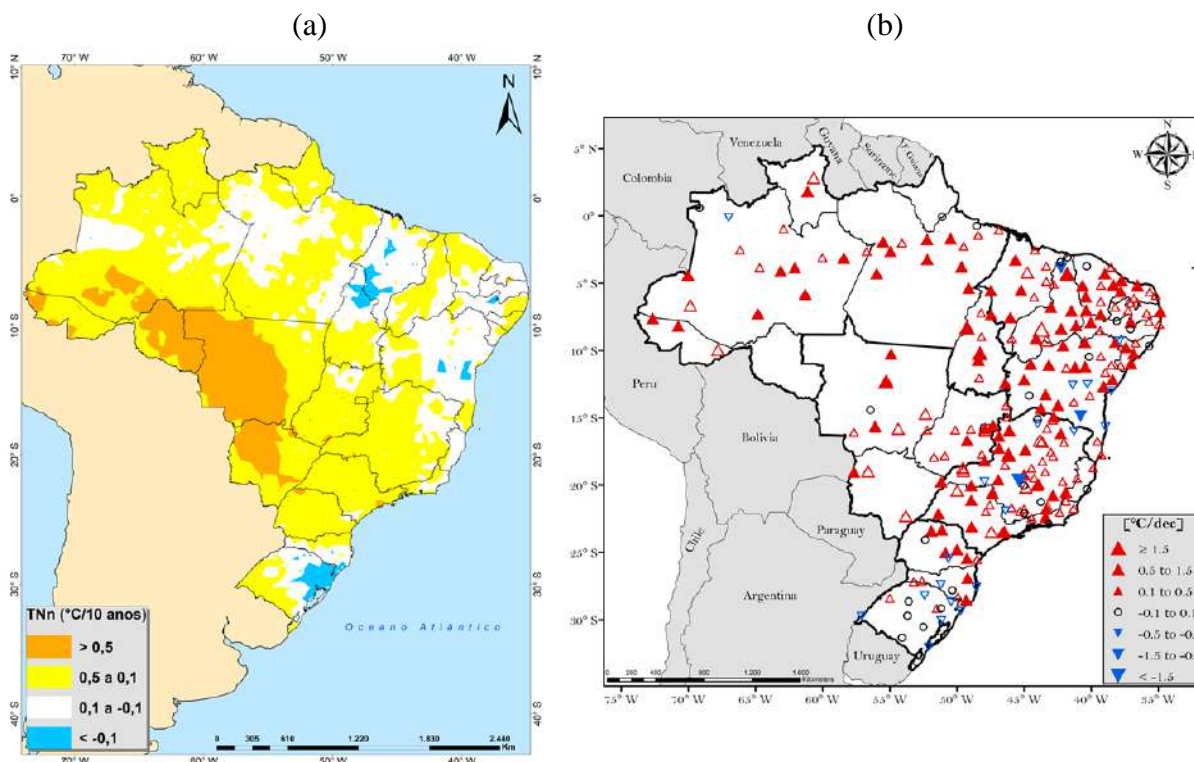


Figura 5.15 – Tendências do indicador TNN (°C/década) sobre o Brasil. Em a) tendências calculadas com dados da reanálise ERA5 considerando o período 1981-2018 e em b) tendências calculadas com dados observacionais no período 1961-2017 (Regoto, 2020).

De uma maneira geral, a reanálise ERA5 apresenta tendência de aquecimento do clima na maior parte do Brasil em todos os indicadores estudados, compatível com os dados observados. Esse aquecimento generalizado também é visto por Skansi et al. (2013). O aumento de dias e noites quentes e a redução de noites e dias frios são bem representados pela reanálise quando comparada aos dados observacionais. Isto também é visto ao analisar as maiores e menores temperaturas máximas e mínimas diárias. Entretanto, em partes da Região Sul e no interior do Nordeste a reanálise ERA5 não detecta bem esse aquecimento e muitas vezes indica um sinal oposto, de resfriamento. Na Região Sudeste, observa-se pelos resultados da reanálise também um sinal de aquecimento, entretanto esse aumento é mais expressivo na maior e menor temperatura máxima diária (TXx e TXn), enquanto os dados observacionais indicam um sinal mais forte de aquecimento na maior e na menor temperatura mínima diária (TNx e TNN). Esse sinal forte de aumento de TXx e TXn pela reanálise ERA5 se estende por uma área desde o Sudeste, passando pelo Centro-Oeste até a região Norte.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o desempenho da reanálise ERA5 na representação da climatologia de temperatura do ar e precipitação e das tendências de extremos climáticos no Brasil no decorrer das últimas décadas.

Primeiramente, a fim de verificar a performance da reanálise ERA5 na caracterização climatológica das diferentes regiões do Brasil e assim saber se há discrepâncias entre os dados assimilados e observados *in situ*, foram apresentados os principais aspectos da climatologia de precipitação e das temperaturas máxima e mínima no país, representados pela reanálise ERA5 no período de 1981 a 2010. Essa climatologia foi confrontada com as Normais Climatológicas do INMET para o mesmo período. Depois, para a avaliação do desempenho da reanálise ERA5 na representação dos extremos de precipitação e de temperatura e suas tendências, foram utilizados dados no período de 1981 a 2018. Os resultados gerados pela reanálise foram comparados com as tendências calculadas por Regoto (2020) a partir de dados observacionais de estações do INMET e da ANA.

A reanálise ERA5 representa bem os padrões espaciais climatológicos de temperatura e de precipitação no Brasil e sua variabilidade, identificando regiões onde ocorrem máximos e mínimos dessas variáveis relacionados às características fisiográficas dessas regiões. Os principais aspectos bem representados são os maiores acumulados pluviométricos concentrados nas Regiões Norte e Sul do Brasil, além dos menores volumes de chuva na Região Nordeste do país e a sazonalidade da precipitação nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste. Em relação à temperatura, também são bem representadas as temperaturas mais elevadas no verão e as temperaturas mais baixas nas Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste devido à entrada de ar mais frio durante os meses de inverno, além das temperaturas máximas maiores em julho em partes da Região Norte e Centro-Oeste devido à nebulosidade reduzida nessas áreas no inverno. Outro padrão bem simulado também é a influência da topografia na diminuição das temperaturas em regiões de serra. Contudo, há subestimativas e superestimativas pontuais dos valores de precipitação e de temperatura mínima e uma subestimativa generalizada dos valores de temperatura máxima sobre o Brasil.

Com relação aos indicadores de extremos climáticos, a reanálise ERA5 consegue detectar os mesmos sinais na maioria das regiões do país para os indicadores de precipitação, exceto para a Região Sul, onde a reanálise mostrou resultados diferentes dos dados observacionais em todos os índices que foram analisados, ou seja, ausência ou redução dos extremos de precipitação, enquanto os dados observados exibem elevação. De uma maneira geral, os resultados da reanálise apontam para redução das chuvas no setor centro-norte do país. Para os indicadores de temperatura, a reanálise ERA5 apresenta tendência de aquecimento na maior parte do Brasil em todos os indicadores estudados, representando bem o aumento de dias e noites quentes e a redução de noites e dias frios, quando comparada aos dados observacionais. Entretanto, em partes da Região Sul e no interior do Nordeste a reanálise ERA5 não detecta bem esse aquecimento.

Sendo assim, a reanálise ERA5 mostrou-se uma boa ferramenta ao se examinar a sua performance na caracterização climatológica do Brasil e, apesar da reanálise detectar bem os padrões espaciais de muitos indicadores de extremos de temperatura e precipitação em várias regiões do Brasil, a ERA5 apresentou uma performance pouco satisfatória nos indicadores analisados para a Região Sul.

Para trabalhos futuros sugere-se que análises regionais mais detalhadas da reanálise ERA5 e de outras sejam realizadas tanto para a caracterização climatológica quanto para a identificação de tendências em extremos climáticos, para que estudos de impactos locais possam ser realizados com maior confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 111, n. 5, p. 1–22, 2006.

BENGTSSON ET AL. Integration of Space and In Situ Observations to Study Global Climate Change. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* (1988). DOI: 10.1175/1520-0477(1988)069<1130:IOSAIS>2.0.CO;2

BENGTSSON; S. HAGEMANN; K. I. HODGES. Can climate trends be calculated from reanalysis data? *J. Geophys. Res.*, 109, D11111, 2004 DOI: 10.1029/2004JD004536

CAESAR, J., L. ALEXANDER, AND R. VOSE. Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set. *J. Geophys. Res.*, 111, D05101, 2006. DOI: 10.1029/2005JD006280.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M. C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J.-G.: Introduction. In: *Climate Change 2013: 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.; Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

DUNN, R. J. H.; WILLETT, K. M.; MORICE, C. P.; PARKER, D. E. Expanding HadISD: Quality-controlled, sub-daily station data from 1931. *Geoscience Data Journal*, v. 7, n. 2, p. 66–93, 2020. DOI: 10.1002/gdj3.102.

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; CAESAR, J. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, p. 130125093450003, 2013a. DOI 10.1175/BAMS-D-12-00109.

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; DUNN, R. J. H.; WILLETT, K. M.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; CAESAR, J.; HEWITSON, B.; JACK, C.; TANK, A. M. G. K.; KRUGER, A. C.; MARENGO, J.; PETERSON, T. C.; RENOM, M.; ROJAS, C. O.; RUSTICUCCI, M.; SALINGER, J.; ELRAYAH, A. S.; SEKELE, S. S.; SRIVASTAVA, A. K.; TREWIN, B.; VILLARROEL, C. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century : The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 118, p. 2098–2118, 2013b.

DEE, D. P., AND COAUTHORS. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597, 2011a DOI 10.1002/qj.828

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; HEROLD, N.; DITTUS, A. J. Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 121, n. 19, p. 11,174–11,189, 16 out. 2016.

FRICH P, ALEXANDER LV, DELLA-MARTA P, GLEASON B, HAYLOCK M, KLEIN TANKAMG, PETERSON T. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, v. 19, p. 193–212, 2002

HARRIS I, JONES PD, OSBORN TJ, LISTER DH. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 dataset. *Int. J. Climatol.* 34: 623–642, 2014 DOI 10.1002/joc.3711.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000. *Journal of Climate*, v. 19, p. 1490–1512, 2006.

H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J.N. Thépaut The ERA5 global reanalysis. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 146 (730) (2020), pp. 1999–2049 DOI 10.1002/qj.3803

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), Climate Change, In: Houghton J. T.; Jenkins G.J.; Ephraums J.J. (eds.). First Assessment Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia pp. 410, 1990.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). The Science of Climate Change. In: Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

IPCC: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguer, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 881, 2001.

IPCC: Climate Change 2007: 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.; Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 996, 2007.

IPCC: Climate Change 2013: 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.; Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535, 2013.

IPCC: Climate Change 2013: 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.; Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535, 2013.

KALNAY, E., AND COAUTHORS. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. American Meteorological Society*, 77, 437–471, 1996.

KANAMITSU, M., W. EBISUZAKI, J. WOOLLEN, S.-K. YANG, J. J. HNILO, M. FIORINO, AND G. L. POTTER. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin American Meteorological Society*, 83, 1631–1643, 2002 DOI 10.1175/BAMS-83-11-1631.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O.; RENOM, M. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: Part 2: Historical trends. *Climatic Change*, v. 98, n. 3, p. 509–529, 2010.

MATSUURA K, WILLMOTT C. TERRESTRIAL AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION. 1900-2008 gridded monthly time series (V2.01). Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware, 2009 http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/archive.html

NASCIMENTO, M. G.; HERDIES, D. L. ; SOUZA, D. O. ; ANGELIS, C. F. . Evaluation of precipitation over South America in the reanalysis MERRA. In: *The Meeting of the Americas*, 2010, Foz do Iguaçu. *Anais do The Meeting of the Americas*, 2010.

ONOGI, K., AND COAUTHORS. The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369–432, 2007 DOI 10.2151/jmsj.85.369.

REGOTO, P. Mudanças Observadas nos Extremos de Temperatura do Ar e Precipitação Sobre o Brasil. Orientadora: Claudine Pereira Dereczynski. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=9880223

Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624–3648, DOI 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [s. l.], v. 91, n. 8, p. 1015–1058, 2010. DOI 10.1175/2010BAMS3001.1

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014. DOI 10.1175/JCLI-D-12-00823.1

SCHNEIDER U, BECKER A, FINGER P, MEYER-CHRISTOFFER A, RUDOLFB, AND ZIESE M. GPCC Full Data Reanalysis Ver-sion 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges Built on GTS-based and Historic Data, 2011 DOI 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V6_050.

SCHNEIDER U, BECKER A, FINGER P, MEYER-CHRISTOFFER A, ZIESE M, RUDOLF B. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theor. Appl. Climatol.* 115:15–40, 2014 DOI 10.1007/s00704-013-0860-x.

SENEVIRATNE, S.I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C.M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X.: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B.; Barros, V.; Stocker, T.F.; Qin, D.; Dokken, D.J.; Ebi, K.L.; Mastrandrea, M.D.; Mach, K.J.; Plattner, G.-K.; Allen, S.K.; Tignor, M.; Midgley, P.M. (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230, 2012.

SOARES, D.; LEE, H.; LOIKITH, P. C.; BARKHORDARIAN, A.; MECHOSO, C. R. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 3, p. 1483–1493, mar. 2017. DOI 10.1002/joc.4792

SKANSI, M. de los M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; AREVALO GROENING, J. A.; BENTANCUR, O. J.; CASTELLÓN GEIER, Y. R.; CORREA AMAYA, R. L.; JÁCOME, H.; MALHEIROS RAMOS, A.; ORIA ROJAS, C.; PASTEN, A. M.; SALLONS MITRO, S.; VILLAROEL JIMÉNEZ, C.; MARTÍNEZ, R.; ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in

climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, v. 100, p. 295–307, 2013 DOI 10.1016/j.gloplacha.2012.11.004.

TAYLOR KE, STOUFFER RJ, MEEHL GA. An overview of Cmp5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93: 485–498, 2012 DOI 10.1175/Bams-D-11-00094.1.

THORNE, P. W. AND R. S. VOSE. Reanalyses suitable for characterizing long-term trends. Are they really achievable? *Bull. American Meteorological Society*, 91, 353–361, 2010 DOI 10.1175/2009BAMS2858.1.

UPPALA, S. M., AND COAUTHORS. The ERA-40 Re-Analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 2961–3012, 2005 DOI 10.1256/qj.04.176.

VINCENT, L. A.; PETERSON, T. C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate*, v. 18, n. 23, p. 5011–5023, dez. 2005. DOI 10.1175/JCLI3589.1

ZHANG, X.; YANG, F. *RClimDex (1.0) – User Manual*. Climate Research Branch Environment. Canada Downsview, 2004.