

GABRIELA REGINA FERREIRA

**EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS  
HIDROGRÁFICAS DOS RIOS DOCE E PARAÍBA DO SUL**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

F383e  
2019  
Ferreira, Gabriela Regina, 1988-  
Eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas  
dos rios Doce e Paraíba do Sul / Gabriela Regina Ferreira. –  
Viçosa, MG, 2019.  
xi, 34 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 31-34.

1. Precipitação (Meteorologia). 2. Doce, Rio, Bacia (MG e ES). 3. Paraíba do Sul, Rio, Bacia. 4. Climatologia. 5. Mudanças climáticas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. II. Título.

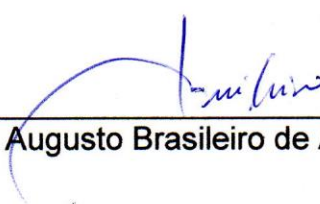
CDD 22. ed. 551.577

GABRIELA REGINA FERREIRA

**EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS  
DOS RIOS DOCE E PARAÍBA DO SUL**


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

APROVADA: 27 de fevereiro de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Augusto Brasileiro de Alencar

  
\_\_\_\_\_  
Jackson Martins Rodrigues

  
\_\_\_\_\_  
Marília Carvalho de Melo

  
\_\_\_\_\_  
Flávio Barbosa Justino  
(Orientador)

À minha família, dedico.

*“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso, aprendemos sempre.”*

*Paulo Freire*

*“[...] Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu, é sobre escalar e sentir que o caminho de fortaleceu. [...]”*

*Trem bala – Ana Vilela*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por guiar meus passos e escolhas, mesmo quando eu me fiz desacreditada.

Ao meu esposo pela compreensão nos momentos em que me fiz ausente e aos meus filhos, motivos que me fazem querer ir sempre além.

Aos meus pais e meu irmão pela estrutura familiar servindo de conforto e apoio, pelas palavras de incentivo e por vibrarem comigo a cada nova fase da minha vida.

Ao orientador prof. Dr. Flávio Barbosa Justino, pela oportunidade de realização da pesquisa. Obrigada pela paciência e dedicação!

Aos colegas de curso e aos “irmãos de orientação”, em especial aos que conviveram comigo dividindo a mesma sala Álvaro, Cristian, Manuel e Vágna. Obrigada por não medirem esforços para a realização desse trabalho.

Ao prof. Dr. Edson Soares Fialho por ter me inserido na área da pesquisa.

Ao prof. Dr. Paulo Hamakawa pelas palavras que me fizeram refletir e me tornar um ser humano mais maduro e ciente.

Ao colega Williams Pinto Marques Ferreira por ter me encorajado a seguir na carreira científica.

À Graça pela presteza e atenção dada durante todo o curso.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola e todos seus funcionários, pelo carinho e tratamento dado no dia a dia.

Ao CNPq, agradeço pela oportunidade de crescimento profissional e concessão da bolsa de pesquisa.

À todos que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, sou grata!

## **BIOGRAFIA**

GABRIELA REGINA FERREIRA, filha de Silvio Henrique Ferreira e Gilceli Luzia da Conceição Ferreira, nasceu em 02 de junho de 1988, na cidade de Viçosa - MG.

Em março de 2011 iniciou a graduação em Geografia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), obtendo o título de Bacharela em Geografia em julho de 2015.

Em agosto de 2016 iniciou o mestrado em Meteorologia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2019.

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS.....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>RESUMO .....</b>   | <b>x</b>    |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>    |
| <b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>4</b>    |
| <b>2.1 Região de estudo .....</b>   | <b>4</b>    |
| <b>2.2 Banco de dados.....</b>  | <b>5</b>    |
| <b>2.3 Índices extremos de precipitação .....</b>                                       | <b>6</b>    |
| <b>2.4 Análise da tendência e significância estatística .....</b>                       | <b>7</b>    |
| <b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>   | <b>9</b>    |
| <b>3.1 Climatologia das bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul .....</b>   | <b>9</b>    |
| <b>3.2 Comportamento espacial e temporal dos índices extremos de precipitação .....</b> | <b>12</b>   |
| <b>3.2.1 Caracterização espacial dos índices extremos de precipitação .....</b>         | <b>12</b>   |
| <b>3.2.2 Tendência decenal dos índices extremos de precipitação ....</b>                | <b>16</b>   |
| <b>3.3 Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação e ENOS.....</b>    | <b>20</b>   |
| <b>4 DISCUSSÃO.....</b>   | <b>26</b>   |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>   | <b>29</b>   |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>31</b>   |

**LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Localização geográfica das bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul com respectivas Unidades de Planejamento (UPs) e altimetria.....  | 4  |
| Figura 2 - Variação anual da precipitação média e temperatura média do ar na BHRD (a) e BHRPS (b) no período de 1980 a 2015. ....   | 9  |
| Figura 3 - Variação interanual da precipitação média e temperatura média do ar na BHRD (a) e BHRPS (b). Médias anuais (colunas em preto e linhas vermelhas) e interanuais (linhas azuis e amarelas). ....     | 10 |
| Figura 4 - Espacialização da média anual da precipitação, evapotranspiração de referência e temperatura média do ar, tendências e significâncias estatísticas na BHRD e BHRPS no período de 1980 a 2015. .... | 11 |
| Figura 5 - Comportamento médio dos índices extremos de precipitação.....  | 13 |
| Figura 6 - Média zonal dos índices extremos de precipitação para o período de 1980-2015. ....   | 15 |
| Figura 7 - Distribuição espacial da tendência e significância estatística dos índices extremos de precipitação. ....  | 18 |
| Figura 8 - Tendências dos índices extremos de precipitação referentes à percentagem de pixels em cada bacia hidrográfica. ....  | 19 |
| Figura 9 - Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Doce e média do período analisado (linha vermelha).....   | 21 |
| Figura 10 - Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e média do período analisado (linha vermelha).....                                      | 22 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Índices extremos de precipitação, definições e unidades .....  | 7  |
| Tabela 2 - Anos de ocorrência dos eventos El Niño e La Niña .....   | 23 |
| Tabela 3 - Magnitude das anomalias dos índices extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul durante o El Niño de 1983 ..... | 24 |
| Tabela 4 - Magnitude das anomalias dos índices extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul durante a La Niña de 2007 ..... | 24 |

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

|         |   |
|---------|---|
| ANA     | Agência Nacional das Águas  |
| BHRD    | Bacia hidrográfica do rio Doce  |
| BHRPS   | Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul                              |
| CDD     | Dias secos consecutivos   |
| CWD     | Dias úmidos consecutivos  |
| ETCCDMI | <i>Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices</i> |
| n.s     | Não significativo   |
| p       | Nível específico de significância                                     |
| PRCPTOT | Precipitação total anual em dias úmidos                               |
| RR      | Precipitação diária em dia úmido                                      |
| Rx1day  | Precipitação máxima em 1 dia  |
| Rx5day  | Precipitação máxima em 5 dias consecutivos                            |
| R99p    | Dias extremamente úmidos  |
| R1mm    | Número de dias úmidos   |
| R20mm   | Número de dias com precipitação acima de 20 mm                        |
| T       | Tendência   |
| SDII    | Índice de intensidade diária simples                                  |
| UPs     | Unidades de Planejamento  |

## RESUMO

FERREIRA, Gabriela Regina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul.** Orientador: Flávio Barbosa Justino.

Em cenários de mudanças climáticas os eventos extremos de curta duração, tais como chuvas intensas, períodos secos e temporais tendem a se tornar mais frequentes, fato que já vem sendo observado desde a segunda metade do século XX. Os extremos hidrológicos, especialmente de seca, aumentam a incerteza ou o risco na gestão de recursos hídricos, pois a gestão da oferta é diretamente afetada, prejudicando assim o abastecimento nos usos múltiplos. Neste sentido, as tendências observadas em extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul foram caracterizadas para o período de 1980 a 2015. Foram analisadas a climatologia das bacias hidrográficas e 9 índices de precipitação propostos pelo *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI), em seguida foram aplicados os testes não-paramétricos Mann-Kendall e o Estimador de tendência linear Sen. Por meio de inferência visual foi realizada a associação da média dos índices de precipitação com os anos de ocorrência do El Niño Oscilação Sul. Na bacia hidrográfica do rio Doce foi observada uma tendência clara de que a precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) diminuiu, ao passo que os dias secos consecutivos (CDD) aumentaram, principalmente na porção norte da bacia hidrográfica, tendo como indícios que a precipitação se concentra em um período de tempo mais curto, sendo também mais intensa. Na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a análise não revela uma mudança clara e abrangente na tendência dos índices, mas é possível identificar uma diminuição estatisticamente significativa da intensidade diária da precipitação (SDII). Em geral, observa-se uma tendência crescente (decrecente) nos índices referentes ao excesso de precipitação na porção norte (sul) da bacia. Além disso foi identificada a variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação em ambas as bacias hidrográficas, sendo os mesmos sensíveis à episódios isolados do El Niño Oscilação Sul.

## ABSTRACT

FERREIRA, Gabriela Regina, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Extreme precipitation events in the Doce and Paraíba do Sul river basin.** Adviser: Flávio Barbosa Justino.

In scenarios of climate change, extreme events, such as heavy rain, dry periods and storms tend to become more frequent, a fact that has been observed since the second half of the 20th century. Hydrological extremes, especially drought, increase the uncertainty or risk in the management of water resources, for the management of the offer is directly affected, hindering the supply in multiple uses. In this sense, the trends in extreme precipitation in the Paraíba do Sul and Doce river basins were characterized for the period of 1980 to 2015. We analyzed the river basin climatology and 9 precipitation indices proposed by the Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices (ETCCDMI), then applied the non-parametric Mann-Kendall and the estimator linear trend Sen through visual inference was held the membership average precipitation indices with the occurrence of the El Niño Southern Oscillation. In the Doce river basin was observed a clear trend that the annual total precipitation in days with high humidity (PRCPTOT) decreased, while the consecutive dry days (CDD) increased, especially in the northern portion of the watershed, with evidence that the rainfall concentrates in a shorter period of time, being also more intense. In the Paraíba do Sul river basin, the analysis does not reveal a clear and comprehensive change in the trend of the indexes, but it is possible to identify a statistically significant decrease in daily rainfall intensity (SDII). In general, there is an increase (decrease) indices for the excessive rainfall in the northern portion (south) of this basin. In addition the interannual variability has been identified extreme precipitation indices in both hydrographic basins, being the same sensitive to single episodes of the El Niño Southern Oscillation.

## 1 INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos em termos meteorológicos ou climatológicos são associados a desvios de um estado atmosférico médio (MARENGO et al., 2007; 2009) e a humanidade desenvolveu uma acurada percepção da frequência e das localizações geográficas onde eles têm mais probabilidade de ocorrer (MARENGO et al., 2009). Entretanto tem se observado nos últimos anos que os eventos extremos de curta duração, tais como chuvas intensas, ondas de calor e frio, períodos secos, temporais e furacões tendem a se tornar mais frequentes (MARENGO et al., 2007), fato este que tem sido atribuído às atividades antrópicas e mudanças climáticas globais (MARENGO et al., 2009; PINHEIRO et al., 2013; ZANDONADI et al., 2015).

No Brasil, os eventos climáticos extremos mais frequentes estão relacionados aos fenômenos hidrometeorológicos, que são indutores de desastres naturais. As projeções do clima apontam para um aumento na intensidade e quantidade de eventos climáticos associados à precipitação em cenários de mudanças climáticas na região sudeste do Brasil (SKANSI et al., 2013; MARENGO, 2014), o que vai demandar maior preparação dos municípios para responder aos desastres naturais (MARENGO, 2014). Esta região caracteriza-se por apresentar alta densidade demográfica e concentrar a maior parte das atividades econômicas do país (NUNES et al., 2009; BRASIL, 2006) e, de acordo com Nunes et al. (2009), apresenta também marcante variabilidade interanual na distribuição temporal das chuvas, com reflexos na agricultura, no abastecimento hídrico e energético.

As mudanças nos eventos extremos de precipitação têm chamado a atenção da sociedade em geral devido aos impactos sociais, econômicos e ambientais (IPCC, 2014; VALVERDE e MARENGO, 2014; ZANDONADI et al., 2015; ÁVILA et al., 2016; DEBORTOLI et al., 2017) pois os eventos extremos acarretam em perdas de vidas humanas, impactos nas atividades agrícolas, abastecimento público e industrial e geração de energia. Os extremos hidrológicos, especialmente de seca, aumentam a incerteza ou o risco na gestão de recursos hídricos. Neste sentido, Valverde e Marengo (2014)

destacam o aumento da demanda e a importância da garantia de oferta do recurso hídrico em quantidade e qualidade visto que a gestão da oferta é diretamente afetada, prejudicando assim o abastecimento nos usos múltiplos. O que torna a gestão dos recursos hídricos dependente do conhecimento do comportamento dos extremos hidrológicos atuais e futuros.

Em 2014, por exemplo, o sudeste brasileiro experimentou uma escassez hídrica de grande abrangência espacial com impactos negativos nas grandes bacias hidrográficas brasileiras, afetando desde o abastecimento de água potável até a geração de energia elétrica nos sistemas produtores do Sudeste e Nordeste (PEREIRA FILHO, 2015). Em São Paulo foi observado um período excepcionalmente seco, com falta de chuva durante várias semanas consecutivas e temperaturas 5.4°C acima da média durante o verão de 2014 (COELHO et al., 2016). Neste verão a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) não se configurou, e o fluxo de umidade transportada pelo jato de baixos níveis (JBN) da Amazônia foi desviado pela ação do bloqueio atmosférico para o sul do Brasil, gerando chuvas e inundações recordes nos estados da região norte (Acre e Rondônia) e sul do Brasil, Paraguai e Norte da Argentina (ESPINOZA et al., 2014; GRIMM, 2019). Além da ZCAS, variabilidade interanual dos eventos extremos de precipitação na região sudeste do Brasil também tem sido associada ao El Niño-Oscilação Sul (ENOS), na região do El Niño 3.4 (GRIMM E TEDESHI, 2009; GRIMM, 2019).

Os eventos extremos têm sido estudados por meio de índices, dentre os quais se destacam os índices climáticos indicados para o monitoramento e a detecção de mudanças climáticas recomendados pelo *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) (SKANSI et al., 2013; VALVERDE E MARENGO, 2014; WU et al., 2015; ÁVILA et al., 2016; ZANDONADI et al., 2016, REGOTO et al., 2018; ZILLI et al., 2016). Esses índices são indicadores da ocorrência de eventos climáticos extremos e caracterizam a variabilidade climática da precipitação e temperatura do ar em séries temporais diárias, além de descreverem as características particulares de extremos climáticos, incluindo frequência, intensidade e duração (ZHANG et al., 2011).

Marengo (2014) ao analisar o histórico de ocorrência de eventos climáticos extremos no Brasil nos últimos 30 anos, observou que tem aumentado a frequência de precipitação no verão e no inverno no Sul e no Sudeste. Porém estudos de longo prazo sobre tendências e mudanças climáticas no Brasil são poucos, devido à baixa consistência e curto período de dados climáticos observados (MARENGO et al., 2009). Observa-se ainda que em escala regional existem muitas incertezas quanto à quantidade, intensidade, frequência e duração dos eventos climáticos extremos (IPCC, 2013; 2018).

Assim, o objetivo nesse estudo foi caracterizar as tendências observadas dos eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, na região sudeste do Brasil, de acordo com os índices climáticos extremos recomendados pelo ETCCDMI, e analisar uma possível relação com o El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Região de estudo

As bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul estão inseridas na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste (Figura 1).

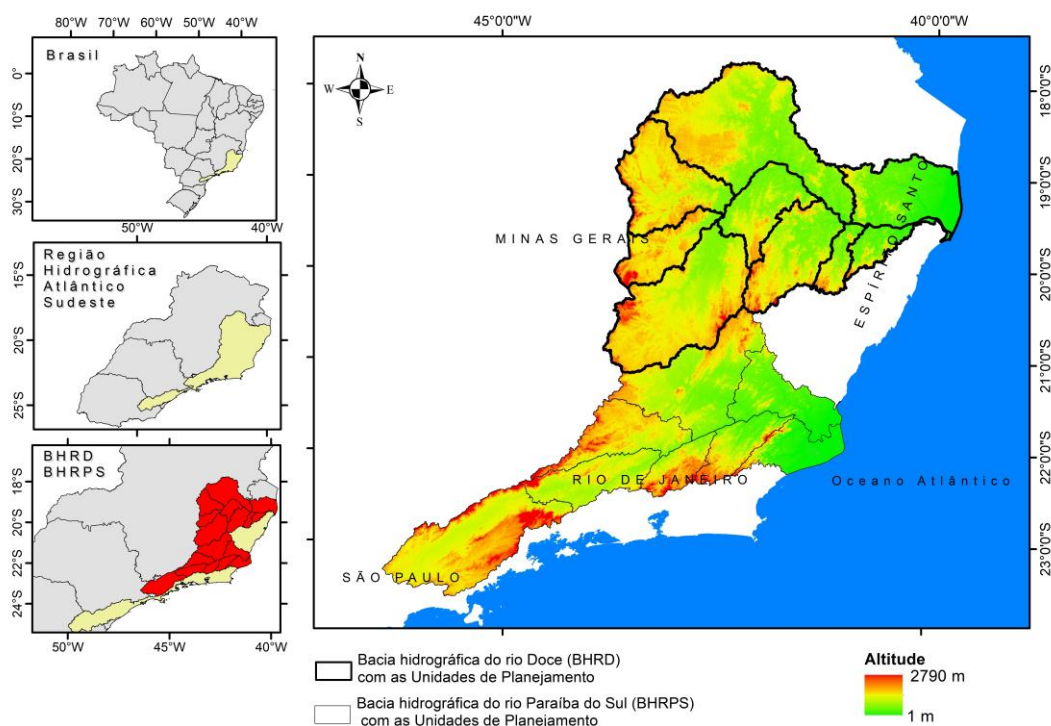


Figura 1 - Localização geográfica das bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul com respectivas Unidades de Planejamento (UPs) e altimetria.  
 Fonte: IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010; SNIRH-Sistema Nacional de Recursos Hídricos e SRTM-Shuttle Radar Topography Mission (30 m).

A Região Hidrográfica Atlântico Sudeste constitui-se em uma das áreas mais desenvolvidas do país mas que tem grande potencial de conflitos no que se refere ao uso dos recursos hídricos. Já que ao mesmo tempo em que apresenta uma das maiores demandas hídricas nacionais possui também uma das menores disponibilidades relativas, além do recurso hídrico ser compartilhado por atividades distintas tais como abastecimento público, irrigação, geração de energia, pesca, recreação, diluição de esgoto, dentre outros (ANA, 2017).

A bacia hidrográfica do rio Doce está situada entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo compreendendo os paralelos 17°45' e 21°15' de latitude sul e os meridianos 39°55' e 43°45' de longitude oeste. Os rios que alimentam o rio Doce situam-se na Serra da Mantiqueira e do Espinhaço, com altitudes superiores a 1.500 metros e deságuam no estado do Espírito Santo, no povoado de Regência. Com base nas informações extraídas dos dados do Xavier et al. (2017) no período de 1980-2015 a precipitação média anual e temperatura média anual do ar da bacia são de 1187 mm e 27,3 °C, respectivamente.

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul situa-se entre os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro nos paralelos 20°43' e 23°63' de latitude sul e os meridianos 40°97' e 46°30' de longitude oeste. O rio Paraíba do Sul nasce na Serra da Bocaina no Estado de São Paulo, a 1.800m de altitude e deságua no norte fluminense, no município de São João da Barra, percorrendo uma extensão aproximada de 1.150km (MARENCO e ALVES, 2005). Com base nas informações extraídas dos dados do Xavier et al. (2017) no período de 1980-2015, a precipitação média anual e temperatura média anual do ar da bacia são de 1328 mm e 26,2 °C, respectivamente.

## **2.2 Banco de dados**

Foi utilizado o conjunto de dados interpolados no formato Network Common Data Form (NetCDF) elaborado no projeto de parceria entre a Universidade do Texas (Estados Unidos) e a Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil) em uma grade regular de 0,25° de latitude × 0,25° de longitude (resolução espacial de ~ 30 km) cobrindo todo o Brasil. Esses dados estão disponíveis no link: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>. Os dados originais utilizados na elaboração desse conjunto de dados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agência Nacional de Águas (ANA) e Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). O método usado na elaboração e atualização do conjunto de dados é descrito por Xavier et al. (2016; 2017). Para análise climatológica nas duas bacias hidrográficas foram utilizados os dados da precipitação acumulada

diária, evapotranspiração de referência, temperatura máxima e mínima extraídas da área que recobre as bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul do período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2015.

### **2.3 Índices extremos de precipitação**

O *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) definiu 27 índices climáticos (16 se referem à temperatura, e 11 são índices pluviométricos) que descrevem as características particulares dos extremos climáticos, incluindo frequência, intensidade e duração, cujo o objetivo é obter uma perspectiva uniforme sobre as mudanças de extremos climáticos em séries temporais e descrever aspectos dos eventos climáticos extremos baseados em limites absolutos ou relativos (percentuais) conforme mencionado em <https://www.climdex.org/learn/indices/> (PETERSON e MANTON, 2008; ZHANG et al., 2011). Os índices extremos de precipitação são definidos ao se considerar as precipitações diárias superiores ou iguais a 1 mm (úmido) e inferiores a 1 mm (secos). Informações detalhadas encontram-se disponíveis no link <http://etccdi.pacificclimate.org/>.

Foram considerados nesse trabalho os índices relativos à precipitação. Para a determinação dos extremos climáticos de precipitação, foram calculados nove índices (Tabela 1) os quais estão relacionados aos eventos extremos de precipitação que ocorrem na região sudeste do Brasil (ÁVILA et al., 2016; ZILLI et al., 2018).

Tabela 1 - Índices extremos de precipitação, definições e unidades

| Indicativo  | Índice  | Definição   | Unidade |
|-------------|---------|---|---------|
| Intensidade | PRCPTOT | Precipitação total anual em dias úmidos   | mm      |
|             | SDII    | Média de precipitação com dias de chuvas $\geq 1$ mm  | mm/dia  |
|             | Rx1day  | Quantidade máxima de precipitação em 1 dia  | mm      |
|             | Rx5day  | Quantidade máxima de precipitação em 5 dias consecutivos  | mm      |
|             | R99p    | Precipitação anual que excedeu o percentil 99 no período de 1980 a 2015 (percentil: dias extremamente úmidos).        | mm      |
| Frequência  | R1mm    | Número de dias com precipitação $\geq 1$ mm   | dias    |
|             | R20mm   | Número de dias com precipitação $\geq 20$ mm  | dias    |
| Duração     | CWD     | Número máximo de dias úmidos consecutivos (nº de dias consecutivos em que a precipitação foi superior ou igual a 1mm) | dias    |
|             | CDD     | Número máximo de dias consecutivos com precipitação $< 1$ mm (dias consecutivos secos)                                | dias    |

Conforme a tabela 1, os índices SDII, Rx1day, Rx5day e R99p estão associados à intensidade da precipitação, R1mm, R20mm à frequência, CDD e CWD indicam duração enquanto PRCPTOT quantidade total de precipitação em dias úmidos.

A série de precipitação diária em formato NetCDF foi inserida em ambiente computacional R e em seguida submetida às análises do pacote R-climdex.psic.ncdf versão 0.5-4 desenvolvido por Bronaugh (2014) para obtenção de um valor extremo em escala anual em cada pixel da imagem, para cada um dos 9 índices.

## 2.4 Análise da tendência e significância estatística

Para análise da tendência nas séries climatológicas foram aplicados os testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e o Estimador de tendência linear Sen (SEN, 1968) para determinar a tendência e a inclinação (magnitude), respectivamente.

O teste de Mann Kendall é um teste estatístico utilizado para dados que não apresentam uma distribuição normal. Assume-se que os dados são aleatórios, independentes e igualmente distribuídos. Comumente utilizado em

análises de séries hidro meteorológicas para análise de tendências, por meio do teste de Mann-Kendall é verificado se uma variável de resposta aleatória aumenta ou diminui no tempo. Apesar da eficiência do teste de Mann-Kendall, ele não fornece a magnitude das tendências detectadas. O estimador de tendência linear Sen fornece essa informação, sendo então um complemento ao Mann-Kendall. Por meio dele é possível identificar o grau de variação dos índices na região do estudo. Mais detalhes sobre essa metodologia podem ser encontrados em Zilli et al. (2016) e Regoto et al. (2018). A hipótese a ser testada – hipótese nula – é a de que a série não apresenta tendência.

A significância estatística da tendência na série temporal foi definida ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ) e 10% ( $p < 0,1$ ).

A combinação do teste de M-K e Estimador de tendência linear Sen tem sido utilizada com sucesso nos estudos do clima (SKANSI et al., 2013; ÁVILA et al., 2016; ZILLI et al., 2016; LOVINO et al., 2018; REGOTO et al., 2018, GARCÍA-CUETO et al., 2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Climatologia das bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul

Os valores médios da precipitação e temperatura média do ar no ciclo anual e interanual ao longo de 36 anos nas bacias hidrográficas dos rio Doce (BHRD) e Paraíba do Sul (BHRPS) são mostrados nas figuras 2 e 3, respectivamente. A temperatura média foi calculada pela média aritmética das temperaturas diárias máximas e mínimas.

Ao longo do ano, os maiores valores de precipitação média ocorreram na BHRPS, com exceção dos meses de novembro e dezembro, enquanto na BHRD estão os maiores valores de temperatura média do ar. As duas bacias diferiram-se entre si por aproximadamente 1 °C na temperatura média anual e 165 mm na precipitação média anual (Figura 2).

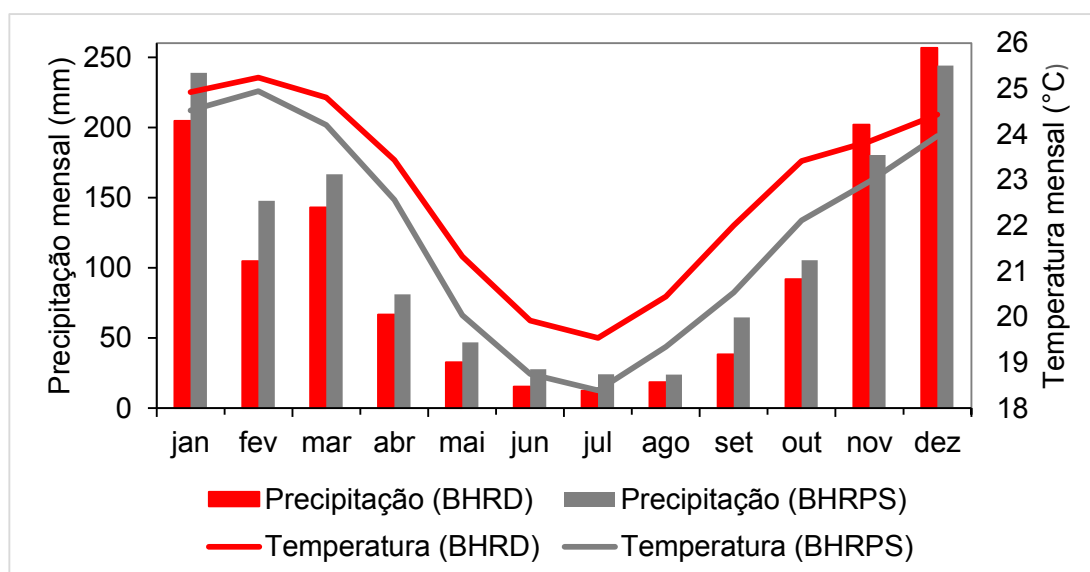


Figura 2 - Variação anual da precipitação média e temperatura média do ar na BHRD (a) e BHRPS (b) no período de 1980 a 2015.

Em relação à variabilidade interanual os totais pluviométricos da BHRD ficaram abaixo da média do período (1187 mm) em 52% do período de estudo, sendo 5 anos seguidos entre os anos de 1986 e 1990 no qual a temperatura média do ar também se manteve acima da média (Figura 3a). Os totais pluviométricos mínimos foram nos anos 2014 (766 mm) e 2015 (744 mm). Já

os totais pluviométricos máximos foram encontrados nos anos 1983 (1666 mm) e 1992 (1641 mm) (Figura 3a).

Na BHRPS os totais pluviométricos ficaram abaixo da média do período (1361 mm) em 58% do período de estudo, incluindo um período de 7 anos seguidos entre os anos de 1997 e 2003, a temperatura média do ar também se manteve acima da média do período nesses anos. Os totais pluviométricos mínimos ocorreram nos anos 1990 (1000 mm) e 2014 (853 mm). Já os totais pluviométricos máximos foram encontrados nos anos 1983 (1996 mm) e 1987 (1737 mm) (Figura 3b).

O campo de temperatura do ar interanual entre as duas bacias se diferem, embora ambas apresentem tendências de aumento (Figuras 3a e 3b) as variações na BHRPS entre 1995 e 2015 foram menos acentuadas que na BHRD, onde entre 2005 e 2015 as temperaturas foram 0.5°C a 1°C acima da média dos 36 anos de análise.

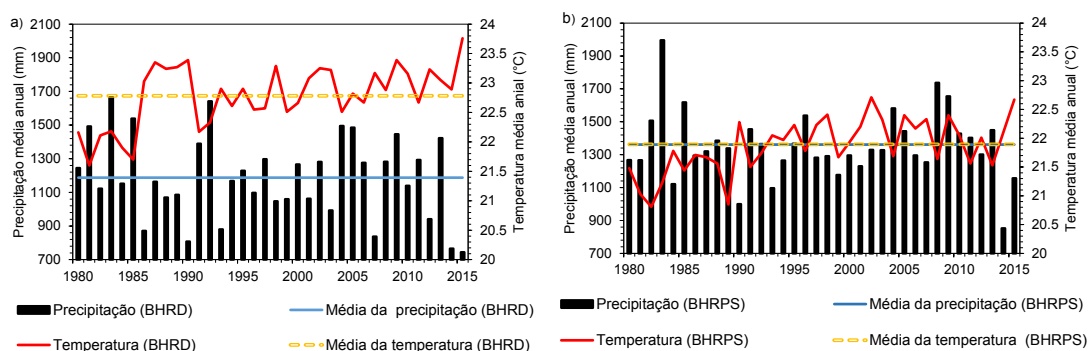


Figura 3 - Variação interanual da precipitação média e temperatura média do ar na BHRD (a) e BHRPS (b). Médias anuais (colunas em preto e linhas vermelhas) e interanuais (linhas azuis e amarelas).

Ao evidenciar a relação entre a precipitação e temperatura do ar em ambas as bacias, foi gerada a espacialização dessas variáveis, acrescida da evapotranspiração de referência para avaliar o comportamento das mesmas ao longo das duas bacias hidrográficas, o que possibilitou uma análise climática setorizada. A espacialização da precipitação média, média da evapotranspiração de referência e temperatura média do ar considerando o período de 1980 a 2015, é apresentada nas Figuras 4a-c, ao passo que a

tendência é apresentada nas Figuras 4d-f e a significância estatística nas figuras 4g-i.

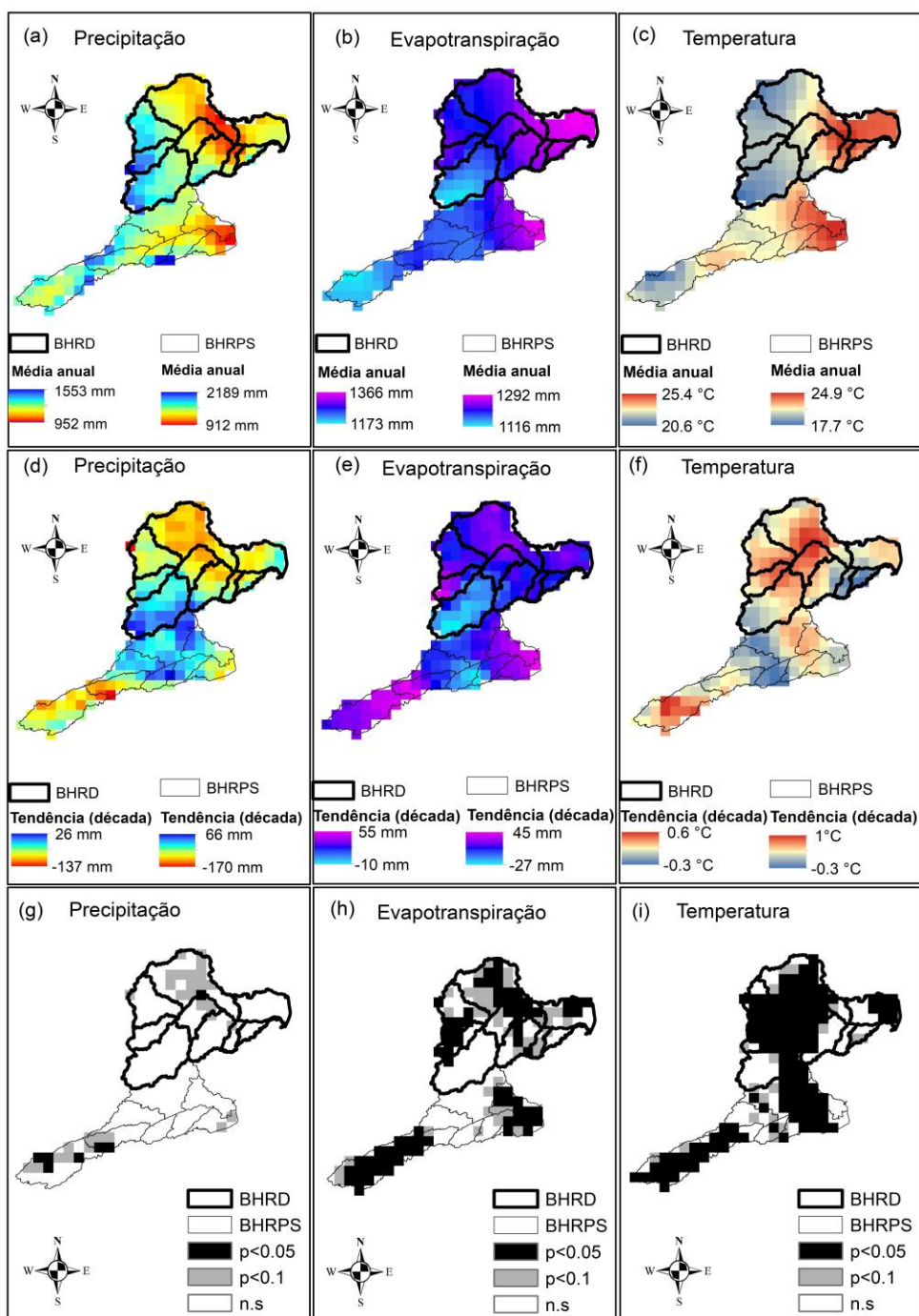


Figura 4 - Espacialização da média anual da precipitação, evapotranspiração de referência e temperatura média do ar, tendências e significâncias estatísticas na BHRD e BHRPS no período de 1980 a 2015.

A evapotranspiração ( $ET_0$ ) mostrou tendência significativa de aumento na porção norte da BHRD enquanto na BHRPS houve aumento na região próxima à nascente e da foz (Figura 4e). A temperatura do ar também apresentou tendência significativa de aumento em praticamente toda a extensão das duas bacias, com exceção de pontos isolados na porção leste e sudoeste da BHRD, e central da BHRPS (Figura 4f).

O aumento na  $ET_0$  e temperatura, em consonância com a redução na precipitação tende a tornar a oferta dos recursos hídricos cada vez mais limitada. Entretanto observou-se na fronteira entre as duas bacias hidrográficas (porção sul da BHRD e norte da BHRPS) que a temperatura do ar e a precipitação tenderam a aumentar, ao passo que a  $ET_0$  tendeu a diminuir, embora apenas a temperatura do ar tenha apresentado significância estatística ( $p < 0,05$ ).

## **3.2 Comportamento espacial e temporal dos índices extremos de precipitação**

### **3.2.1 Caracterização espacial dos índices extremos de precipitação**

Considerando a média dos índices extremos ao longo dos 36 anos de análise (Figuras 5a-i), observa-se que a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul possui maior quantidade total de precipitação em dias úmidos (PRCPTOT) e dias extremamente úmidos (R99p). Esta bacia hidrográfica também apresentou valores médios maiores relacionados à frequência da precipitação, identificado pelo número de dias em um ano com precipitação diária acima de 1 mm (R1mm). A bacia hidrográfica do rio Doce apresentou as menores durações da precipitação acima de 1 mm (R1mm), maior número de dias secos consecutivos (CDD) e maior intensidade diária (SDII).

Foi possível identificar nas Figuras 5a-i o padrão de distribuição predominante no sentido norte-sul em todos os índices, sendo mais representativos para os índices PRCPTOT, R99p, R1mm, CWD e CDD. Estritamente falando, nota-se a redução dos índices de precipitação

relacionados ao excesso de chuva no sentido da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul em direção à bacia hidrográfica do rio Doce.

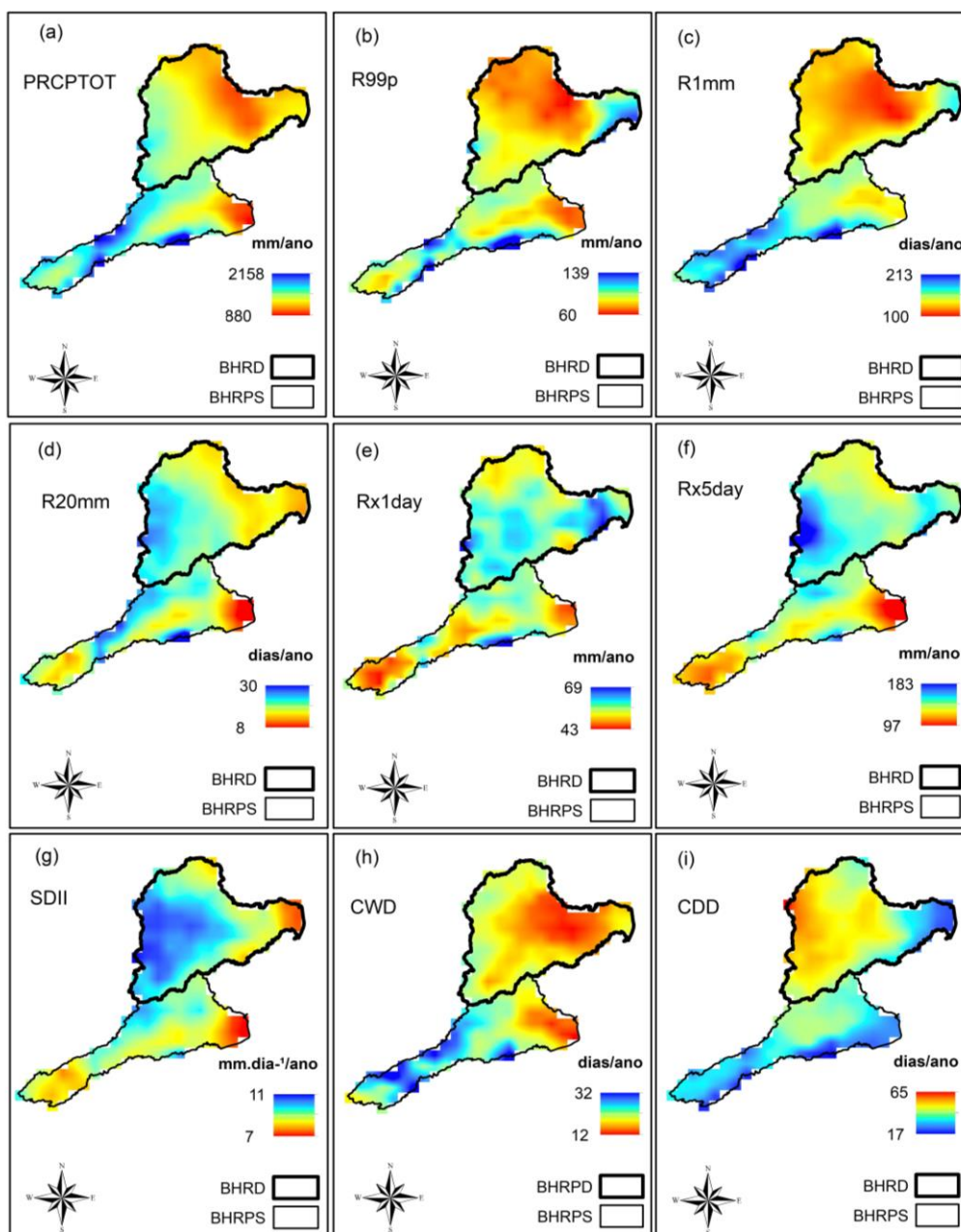


Figura 5 - Comportamento médio dos índices extremos de precipitação.

Observou-se que os índices não se comportam de maneira semelhante nas duas bacias, apresentando inclusive variação dentro da própria bacia no que tange a intensidade, frequência e a duração dos índices extremos de precipitação.

A variabilidade espacial é confirmada pela média zonal dos índices extremos de precipitação, mostrada na Figura 6. Quatro dos nove índices

(PRCPTOT, R99p, R1mm e CWD) apresentaram tendência de diminuição meridional estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ). Observou-se ainda que a aproximadamente cada 30 km no sentido sul-norte a precipitação total anual em dias úmidos tem um decréscimo de 18,92 mm (Figura 6a), para os dias extremamente úmidos (R99p) a redução é de 1,03 mm (Figura 6b), enquanto o número de dias no ano com precipitação acima de 1 mm decresce em aproximadamente 3 dias (Figura 6c), ao passo que os úmidos consecutivos úmidos 0,28 dias (Figura 6d). Já a precipitação acima de 20 mm não apresentou mudanças substanciais, como pode ser observado na Figura 6h. Os índices SDII e CDD apresentaram tendência significativa de aumento no sentido sul-norte (Figuras 6g e 6i), indicando que a precipitação na bacia hidrográfica do rio Doce tem ocorrido em menos dias e com maior intensidade, o que é confirmado pelo aumento dos índices Rx1day e Rx5day (Figuras 6e e 6f), e o oposto ocorre na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

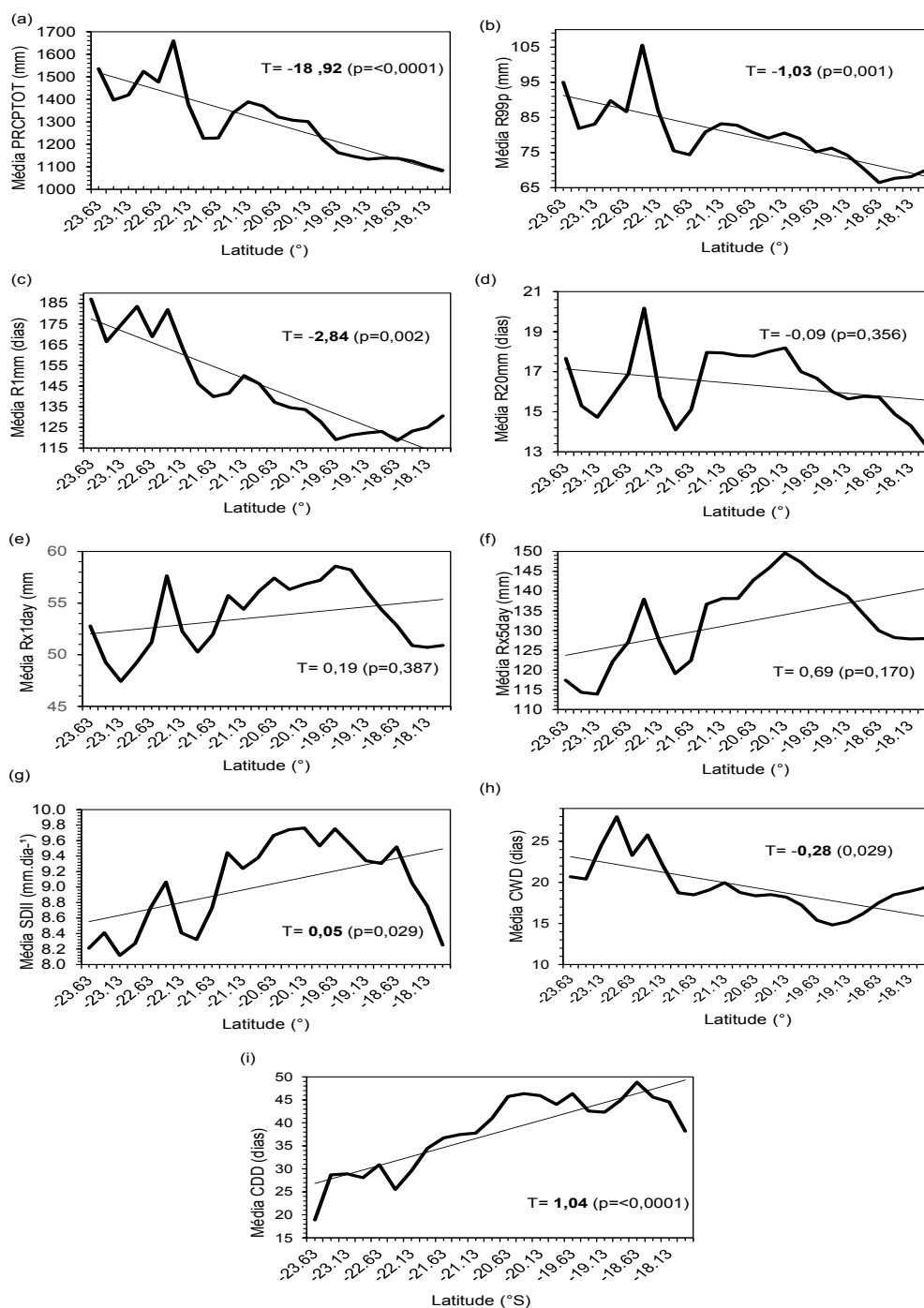


Figura 6 - Média zonal dos índices extremos de precipitação para o período de 1980-2015.

Os resultados apontam que tanto a bacia hidrográfica do rio Doce quanto a do rio Paraíba do Sul são impactadas com a ocorrência de eventos extremos, principalmente chuvas intensas e dias secos consecutivos em algumas porções das bacias. Identificada a ocorrência de tais eventos, por meio do teste de Mann Kendall e do Estimador de tendência linear Sen foi

possível identificar a tendência dos eventos extremos, conforme as Figuras 7a-i e 8ab, que retratam espacialmente as tendências decenais e a percentagem das tendências observadas em cada pixel referentes a cada índice nas bacias hidrográficas isoladamente.

### **3.2.2 Tendência decenal dos índices extremos de precipitação**

As tendências decenais (Figuras 7a-i) e percentagem de pixels com respectivas tendências (Figura 8ab) foram calculadas para os nove índices extremos de precipitação. Embora em alguns casos as tendências não tenham sido significativas, deve-se destacar que pode estar havendo uma diminuição da disponibilidade da água nas bacias hidrográficas e uma intensificação dos extremos de precipitação.

A porção norte da BHRD apresentou tendência de diminuição da precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) em torno de 80 mm/década, os índices precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos (Rx5day) e intensidade diária da precipitação (SDII) também apresentaram tendência de diminuição. Os dias úmidos consecutivos (CWD) apresentam tendência de diminuição ao longo de toda a bacia, da nascente com a maior taxa de queda (em torno de 3 dias/década) em direção à foz em Regência no estado do Espírito Santo (aproximadamente 1 dia/década).

Os dias secos consecutivos (CDD) aumentaram em torno de 6 dias/década na porção norte da BHRD. Na porção sudeste houve tendência de aumento da intensidade diária (SDII) em torno de 0.7mm.dia<sup>-1</sup>/década. Também foi observado acréscimo de aproximadamente 6 mm/década para a precipitação máxima acumulada em 1 dia (Rx1day) na porção sul da bacia. Os dias extremamente úmidos (R99p) praticamente não apresentaram tendência na BHRD (identificado pelas áreas em branco na figura 7b), em consonância como o padrão de déficit de precipitação nessa bacia hidrográfica.

Na porção nordeste da BHRPS observa-se aumento da precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT), precipitação máxima acumulada em 5 dias consecutivos (Rx5day), número de dias com precipitação acima de

20mm (R20mm) e intensidade diária (SDII) (Figuras 7a, 7d, 7f, 7g), além da diminuição significativa da precipitação total em dias úmidos (PRCPTOT), intensidade, frequência e duração da precipitação na porção central e sudoeste da bacia (Figuras 7a, 7d, 7e, 7f, 7g e 7h). Embora não significativa, observou-se também tendência de diminuição da precipitação total em dias úmidos em torno de 56 mm/década na região próxima à foz do rio Paraíba do Sul (Figura 7a).

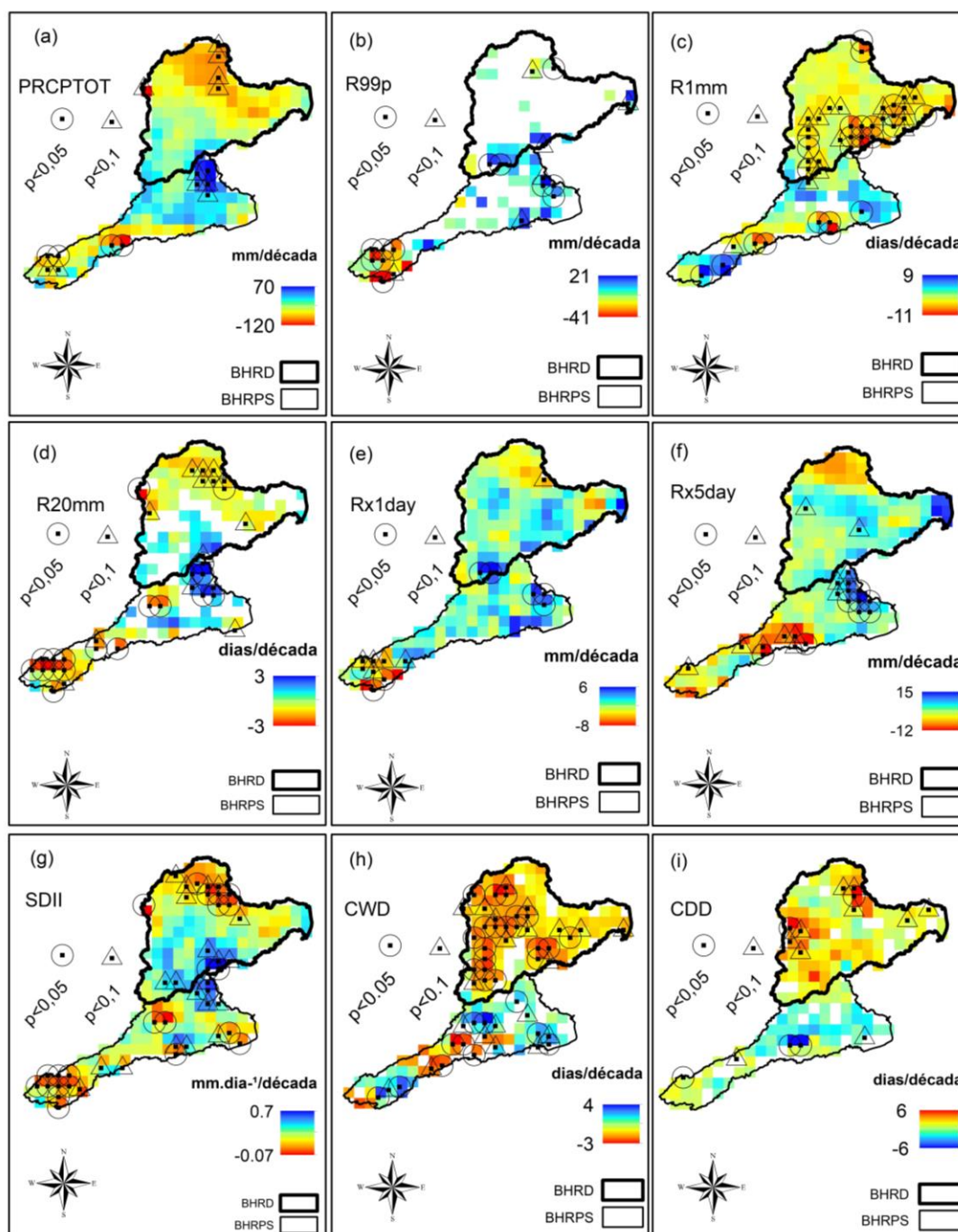


Figura 7 - Distribuição espacial da tendência e significância estatística dos índices extremos de precipitação.

A tendência negativa da precipitação total anual em dias úmidos (PRCPTOT) na bacia hidrográfica do rio Doce é confirmada pela diminuição dos dias úmidos (R1mm) em 99% dos pixels amostrais na bacia, ao passo que os dias secos consecutivos (CDD) apresentaram tendência de aumento em mais de 70% dos pixels analisados. Todavia, a precipitação máxima em 5 dias consecutivos (Rx5day) aumentou, como pode ser identificado em mais



estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) em todos os índices, embora tenha sido pouco representativa (menos de 16% dos pixels na bacia) (Figura 8b).

Analisando o comportamento médio dos índices (Figuras 5 a-i) e as respectivas tendências (Figuras 7 a-i), identifica-se mudanças no padrão dos eventos como aumento da precipitação total anual em dias úmidos em regiões que apresentam maior quantidade de dias secos consecutivos ou persistência e aumento dos eventos extremos pré existentes.

### **3.3 Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação e ENOS**

Dentre os fatores do clima que influenciam no regime dos eventos extremos na região sudeste do Brasil, Grimm e Tedeshi (2009) e Grimm (2019) observaram que o El Niño Oscilação Sul (ENOS) é a principal fonte de variabilidade interanual da precipitação durante a temporada de monções de verão, sendo a região do El Niño 3.4 a mais correlacionada às anomalias de precipitação extrema na região sudeste do Brasil. Neste sentido, com o intuito de buscar uma resposta para o comportamento dos índices extremos na região de estudo foi feita uma inferência visual entre a variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação relativos à cada bacia hidrográfica (Figuras 9 e 10) e os anos de ocorrência do ENOS durante o período de 1980 a 2015 (Tabela 2).

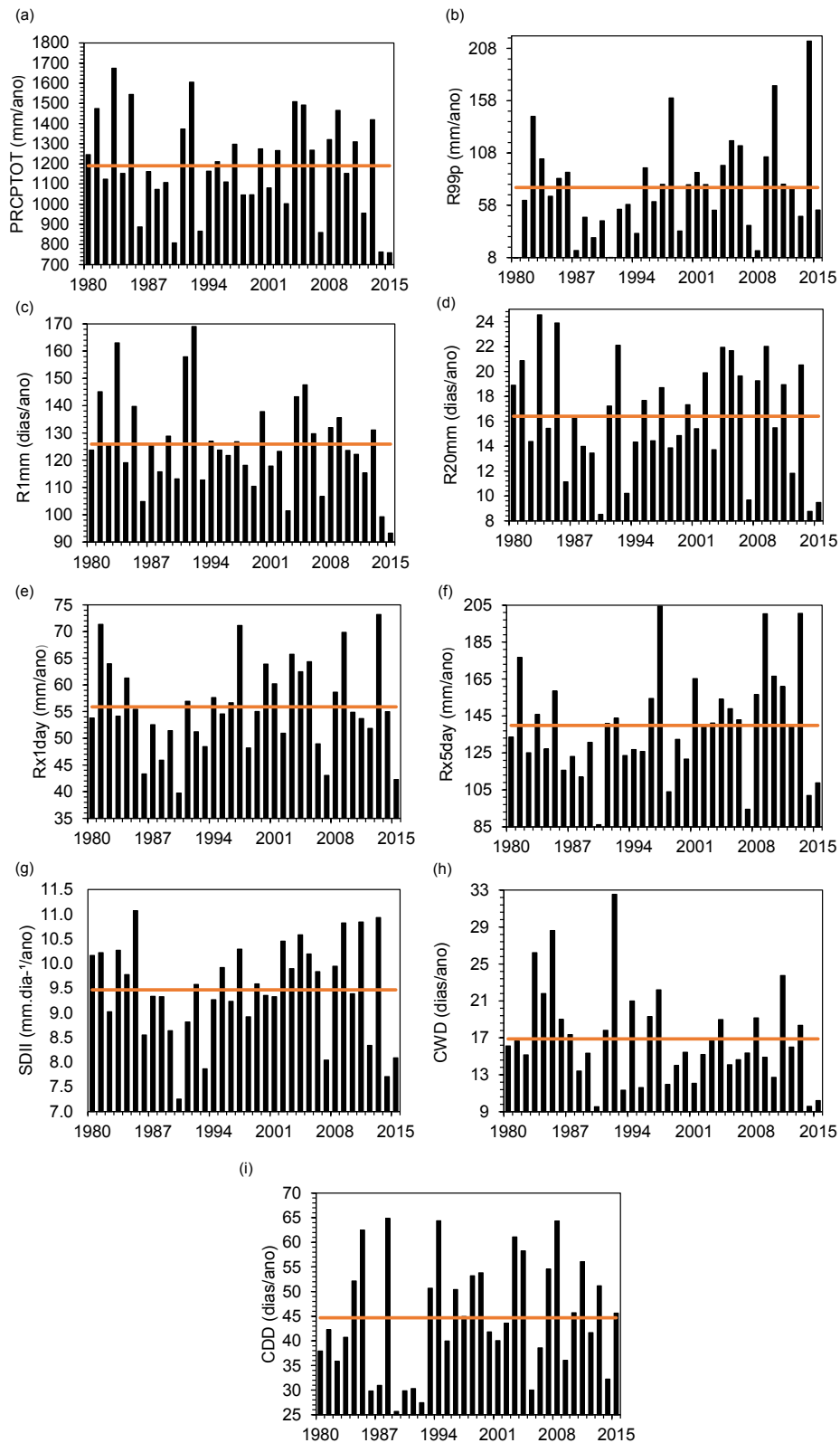


Figura 9 - Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Doce e média do período analisado (linha vermelha).

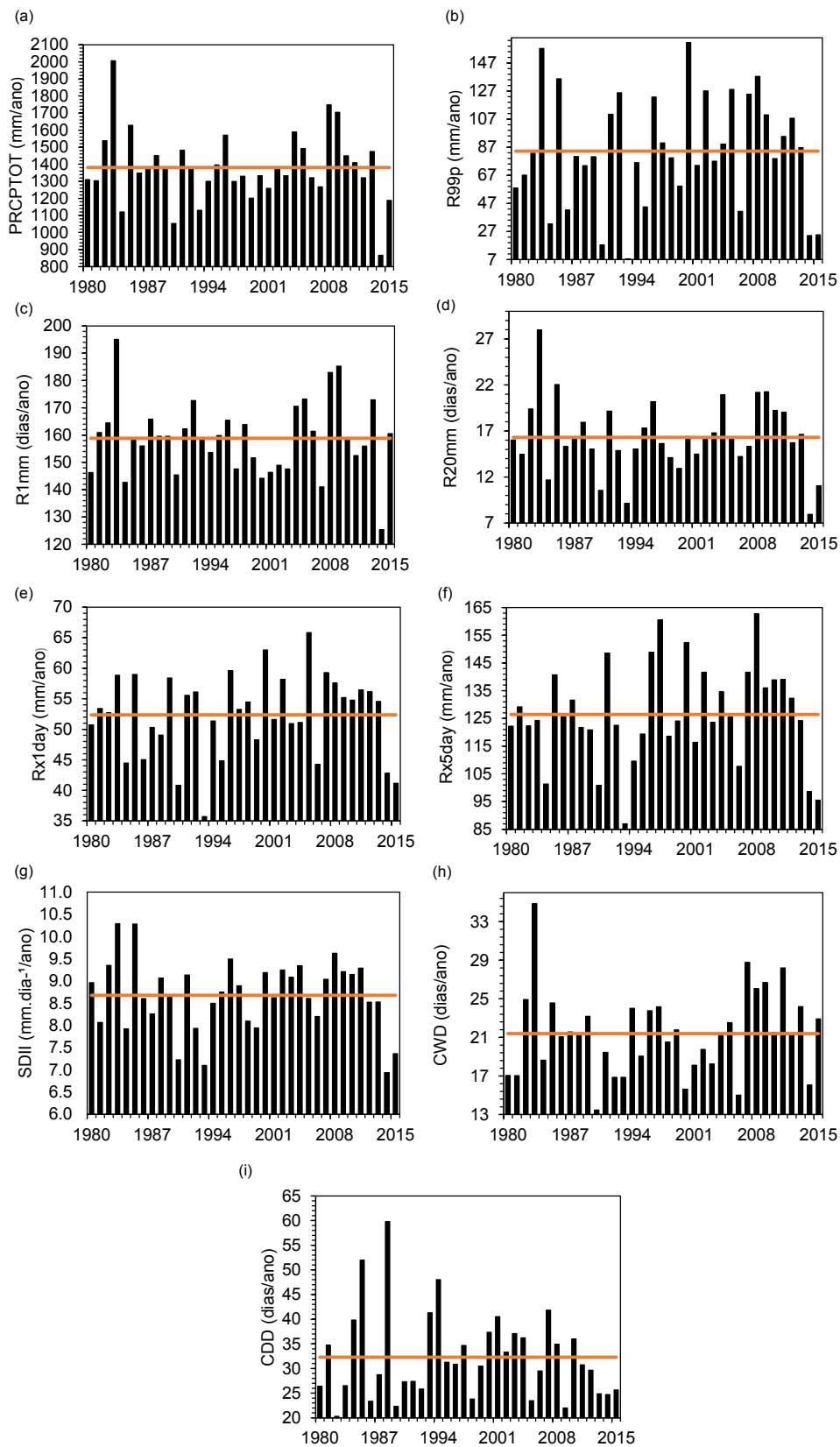


Figura 10 - Variabilidade interanual dos índices extremos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e média do período analisado (linha vermelha).

Identificou-se variabilidade interanual em todos os índices extremos analisados referentes à intensidade, duração e frequência de precipitação (Figuras 9 e 10), estes resultados acrescentam-se às análises de Nunes et al. (2009), que mencionam a alta variabilidade interanual da precipitação na região sudeste do Brasil. Observou-se ainda que o comportamento interanual correspondente ao índice R20mm é semelhante ao comportamento da PRCPTOT, destacando-se os anos em que esses índices estiveram acima da média nas duas bacias hidrográficas (Figuras 9a, 9d e 10a e 10d). Portanto, a precipitação total na região parece estar bem relacionada aos dias com precipitação acima de 20mm.

De acordo com a Tabela 2, no ano 1983 (fase positiva do ENOS; El Niño) (Tabela 2) os índices PRCPTOT, R1mm, R20mm e CWD atingiram os valores máximos na BHRPS correspondendo a 2006 mm, 195 dias, 28 e 34,9 dias, respectivamente. Enquanto na BHRD no mesmo ano os mesmos índices também atingiram os valores máximos, exceto R1mm, que atingiu o valor máximo durante o El Niño de 1992.

Tabela 2 - Anos de ocorrência dos eventos El Niño e La Niña

| El Niño |          |         |             | La Niña |          |         |
|---------|----------|---------|-------------|---------|----------|---------|
| Fraco   | Moderado | Forte   | Muito forte | Fraco   | Moderado | Forte   |
| 1979-80 | 1986-87  | 1987-88 | 1982-83     | 1983-84 | 1995-96  | 1988-89 |
| 2004-05 | 1994-95  | 1991-92 | 1997-98     | 1984-85 | 2011-12  | 1998-99 |
| 2006-07 | 2002-03  |         | 2015-16     | 2000-01 |          | 1999-00 |
| 2014-15 | 2009-10  |         |             | 2005-06 |          | 2007-08 |
|         |          |         |             | 2008-09 |          | 2010-11 |

Fonte: Adaptado de <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.

Por outro lado, em 1988 (fase negativa do ENOS, La Niña) identificou-se a máxima duração dos dias secos consecutivos em ambas as bacias hidrográficas (60 dias na BHRPS e 65 dias na BHRD).

Durante o El Niño de 1983, caracterizado como muito forte, foram identificadas as maiores anomalias dos índices extremos em relação à média

dos 36 anos de análise, sendo as maiores magnitudes obtidas na BHRPS, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Magnitude das anomalias dos índices extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul durante o El Niño de 1983

| <b>Índices</b> | <b>BHRD</b>            | <b>BHRPS</b>           |
|----------------|------------------------|------------------------|
| PRCPTOT        | 484 mm                 | 619 mm                 |
| R99p           | -8 mm                  | 73 mm                  |
| R1mm           | 37 dias                | 36 dias                |
| R20mm          | 8 dias                 | 12 dias                |
| Rx1day         | -2 mm                  | 7 mm                   |
| Rx5day         | 6 mm                   | -2 mm                  |
| SDII           | 1 mm.dia <sup>-1</sup> | 2 mm.dia <sup>-1</sup> |
| CWD            | 9 dias                 | 13 dias                |
| CDD            | -4 dias                | -6 dias                |

As anomalias evidenciam que em média os eventos extremos na BHRPS foram mais sensíveis aos efeitos do El Niño de 1983, observado o aumento nos índices que indicam excesso de precipitação.

Durante a La Niña de 2007, observou-se que todos os índices permaneceram abaixo da média na BHRD, exceto CDD. Ao passo que na BRRPS no ano de 2007 somente os índices PRCPTOT, R1mm e R20mm permaneceram abaixo da média (Tabela 4). Indicando que foi um ano seco na BHRD e com precipitações intensas e concentradas na BHRPS.

Tabela 4 - Magnitude das anomalias dos índices extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul durante a La Niña de 2007

| <b>Índices</b> | <b>BHRD</b>             | <b>BHRPS</b>           |
|----------------|-------------------------|------------------------|
| PRCPTOT        | -331 mm                 | -119 mm                |
| R99p           | -60 mm                  | 41 mm                  |
| R1mm           | -19 dias                | -18 dias               |
| R20mm          | -7 dias                 | - 1 dia                |
| Rx1day         | -13 mm                  | 7 mm                   |
| Rx5day         | -45 mm                  | 15 mm                  |
| SDII           | -1 mm.dia <sup>-1</sup> | 0 mm.dia <sup>-1</sup> |

|     |         |         |
|-----|---------|---------|
| CWD | -2 dias | 7 dias  |
| CDD | 10 dias | 10 dias |

As anomalias evidenciam que em média os eventos extremos na BHRPS apresentaram-se mais sensíveis aos efeitos da La Niña de 2007. Com diminuição nos índices que indicam excesso de precipitação.

Embora haja variabilidade entre os índices nas duas bacias quanto a sensibilidade ao ENOS tanto na fase positiva quanto negativa, identificou-se que nos anos em que ocorrem El Niño predominaram os eventos extremos com precipitação frequentes ao passo que no anos em que ocorreram La Niña predominaram os eventos de secas e eventos intensos na BHRPS.

#### 4 DISCUSSÃO

Os maiores volumes de chuvas na região sudeste do Brasil são concentrados durante o verão, sendo também a época mais propícia à ocorrência de eventos extremos de precipitação (REBOITA, 2018), determinados em grande parte pela intensidade e manutenção da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (NUNES et al., 2009; SELUCHI e CHOU, 2009, LIMA et al., 2010; GRIMM, 2019) e chuvas frontais (LIMA et al., 2010). A ZCAS é um sistema caracterizado por uma banda de nebulosidade orientada na direção noroeste-sudeste que se estende da porção centro sul da Amazônia ao Atlântico sudeste (NUNES et al., 2009). No sudeste do Brasil também é observada correlação entre a região do El Niño 3.4 e as anomalias de precipitação extrema (GRIMM e TEDESHI, 2009).

Observa-se que o comportamento da precipitação e temperatura do ar são semelhantes quanto à distribuição mensal nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, com as maiores taxas de precipitação concentradas em dezembro (Figura 3) característico do clima de monção no qual a região faz parte (LIMA et al, 2010). Uma avaliação conjunta das bacias mostra que embora sejam fronteiriças, estas apresentam variabilidade interanual de precipitação distintas, não só em termos das tendências, mas dos valores anuais máximos e mínimos e época (ano) de ocorrência, o que pode estar relacionado à topografia e bloqueios atmosféricos que impedem que frentes frias e outros sistemas meteorológicos avancem sobre a BHRD, ficando confinados na BHRPS. Ao analisar as médias da evapotranspiração, temperatura do ar e precipitação, identifica-se pontos em que ambas as bacias passam por condições adversas que indicam menor disponibilidade de água no sistema hídrico, devido à diminuição da precipitação e do aumento da temperatura e evapotranspiração.

No que tange aos índices extremos de precipitação, os quais na região de estudo, ocorrem principalmente durante o verão austral, conforme citado por Lima et al. (2010), os eventos de chuvas fortes no verão austral estão associados principalmente a dois tipos de perturbações atmosféricas: as precipitações chamadas “frontais”, caracterizadas por serem de longa

duração, de intensidade moderada e de grande abrangência espacial e as precipitações convectivas, caracterizadas por serem localizadas, intensas e de curta duração, devido ao deslocamento da umidade vinda da Amazônia, as quais podem provocar inundações rápidas (LIMA et al., 2010). A associação entre as variáveis climáticas (evapotranspiração, precipitação e temperatura do ar), acrescidas das tendências observadas nas duas bacias hidrográficas podem vir a intensificar os eventos de cheias e secas nessas regiões e, a depender da intensidade e duração, aumentar a frequência e impactos dos desastres naturais já conhecidos, tais como secas severas, enchentes, inundações e enxurradas nos municípios pertencentes às bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul.

Em termos gerais, com relação aos eventos extremos de precipitação máximos (PRCPTOT, SDII, R99p, R1mm, R20mm, Rx5day, Rx1day, CWD) e mínimos (CDD), em média, na área de estudo os eventos extremos de precipitação mínima aumentaram em duração (CDD), enquanto os eventos extremos máximos aumentaram em intensidade (Rx5day e R99p), diminuindo em frequência (R1mm), intensidade diária (SDII) e total precipitado (PRCPTOT). Se a duração dos dias secos aumenta e o número de dias com precipitação maior ou igual a 1 mm apresenta tendência negativa, os volumes de precipitação total anual podem diminuir. Esse resultado corrobora com Marengo (2014), ao mostrar que a região sudeste do Brasil está se tornando mais seca, com eventos de precipitação mais intensos.

As tendências atuais na região de estudo indicam continuação e intensificação dos eventos extremos de precipitação, vindo ao encontro das tendências projetadas para o sudeste da América do Sul mencionadas por Marengo et al. (2009) durante a segunda metade do século XX.

Vale ressaltar que o comportamento dos índices variou para setores específicos de cada bacia devido à variabilidade espacial da precipitação.

Estudos recentes têm mostrado que o clima da região sudeste do Brasil está se tornando mais úmido, estando relacionado principalmente ao aumento precipitação acumulada nos eventos de chuvas extremas e a sua maior frequência de ocorrência (a exemplo: Skansi et al., 2013; Ávila et al., 2016; Zilli et al., 2016; Regoto et al., 2018). Resultado semelhante foi encontrado

nesse trabalho, ao analisar as bacias hidrográficas separadamente. Observou-se que na bacia hidrográfica do rio Doce, os eventos extremos de precipitação máxima em 5 dias consecutivos aumentaram em uma extensão maior, ao passo que na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a tendência de aumento e diminuição dos índices foram menos coerentes espacialmente, resultado semelhante foi encontrado por Marengo e Alves (2005) para a região sudeste do Brasil.

Analisando isoladamente a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, os resultados vão ao encontro dos encontrados por Skansi et al. (2013) que indicam aumento da condição de umidade para a porção sudeste da América do Sul. Os autores ressaltam que as tendências locais para os índices extremos de precipitação são em geral menos coerentes espacialmente, mas com tendências de aumento espacialmente mais gerais em dias extremamente úmidos em relação a toda a América do Sul. Acrescida a essa constatação, os mesmos autores observaram a intensificação de chuvas intensas na parte oriental do continente sul americano, assim como foi identificado com mais clareza na bacia hidrográfica do rio Doce.

Tendo que mais de 80% da bacia hidrográfica do rio Doce pertence ao estado de Minas Gerais, as tendências encontradas nesse trabalho corroboram com os resultados projetados por Reboita et al. (2018), os autores identificaram para Minas Gerais que a sequência de dias úmidos consecutivos tende a reduzir, enquanto a de dias secos consecutivos a aumentar até o final do século nesse Estado. Observou-se em mais de 60% dos pixels analisados nessa mesma bacia tendência de aumento do índice Rx5day, que corresponde a precipitação máxima em 5 dias consecutivos. Este índice está relacionado à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) o que pode indicar possibilidade de enchentes e deslizamentos (Ávila et al. 2016).

Além da relação documentada sobre os eventos extremos com as frentes frias e ZCAS na região sudeste do Brasil, os índices extremos de precipitação nesse trabalho foram sensíveis a alguns anos de ocorrência do modo de variabilidade El Niño e La Niña, principalmente ao El Niño forte de 1983, coincidindo com o ano em que a precipitação média nas duas bacias

hidrográficas atingiu o valor máximo dentro do período analisado e a La Niña de 2007, entretanto ainda não se pode concluir a relação entre ambos para a região estudada. Conforme as Figuras 9 e 10, observa-se que os anos em que ocorreram eventos ENOS, alguns índices também apresentaram as magnitudes máximas ou mínimas, entretanto apesar dos índices apresentarem aumento (diminuição) da precipitação em eventos El Niño (La Niña), não se observa padrão claro quanto à sensibilidade a ocorrência do ENOS.

Identificadas as tendências nos índices de precipitação, vale ressaltar que os impactos sociais e ambientais de um evento extremo de precipitação dependem também de outras variáveis além do clima, tais como fatores geológicos, geomorfológicos, uso e ocupação do solo e população envolvida, que fogem ao escopo desse trabalho.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os dados diários observados de precipitação utilizados para cálculo dos índices extremos de precipitação foram capazes de identificar o panorama geral dos eventos extremos de precipitação nas bacias hidrográficas dos rios Doce e Paraíba do Sul, destacando a variabilidade espacial das tendências nas duas bacias hidrográficas. Neste sentido foi possível identificar mudanças no comportamento espaço temporal dos índices extremos de precipitação. Os resultados encontrados neste trabalho condizem com as projeções e tendências levantadas em estudos anteriores para a região sudeste do Brasil, apontando que há variabilidade espacial dos eventos extremos e tendência de aumento tanto na frequência, duração quanto intensidade dos eventos extremos para as duas bacias.

As tendências positivas de precipitação observadas na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul servem de alerta para o aumento na intensidade e frequência de eventos extremos como: fortes chuvas, enchentes, inundações, enxurradas e deslizamentos. Na bacia hidrográfica do rio Doce são observadas tendências positivas de dias secos consecutivos

(CDD) e o aumento na intensidade (SDII e Rx5day), índices que indicam probabilidade de enchentes.

De maneira geral, os resultados deste estudo contribuem para um melhor entendimento e maior detalhamento espacial sobre as tendências dos eventos extremos climáticos relacionadas à precipitação nas duas bacias hidrográficas que, apesar de fronteiriças, apresentam padrão climático distinto. Essas percepções, ao discutir o panorama climático e extremos da região podem apoiar decisões sobre alternativas para mitigar possíveis impactos hidrometeorológicos indesejáveis para os múltiplos usos da água.

As razões para as tendências e seus impactos merecem atenção em trabalhos futuros. A fim de proporcionar uma visão ampla da questão dos eventos extremos de precipitação aos tomadores de decisão, recomenda-se para trabalhos futuros a inclusão de outras variáveis tais como informações ambientais e socioeconômicas para se chegar a uma robustez nas análises dos eventos extremos de precipitação nas duas bacias hidrográficas. Recomenda-se ainda análises aprofundadas da relação entre os índices de precipitação extrema e o ENOS na região de estudo.

## REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras** – Edição Especial. -- Brasília: ANA, 2015.

ANA, (2017). **Agência Nacional de Águas: Atlântico Sudeste**. Disponível em < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/atlantico-sudeste> > Acesso em: 26 de outubro, 2017.

ALMEIDA, L.Q., WELLE, T. and BIRKMANN, J. Disaster risk indicators in Brazil: a proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**. Elsevier: 251–72. 2016  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>

ÁVILA, A.; JUSTINO, F.; WILSON, A.; BROMWICH, D. and AMORIM, M. Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. **Environmental Research Letters**, 11(11), p.114029, 2016.

BRONAUGH, D. R Package climdex.pcic: PCIC Implementation of Climdex Routines. **Pacific Climate Impact Consortium**, Victoria, British Columbia, Canada, 2014.

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012: volume Brasil**. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: Ceped UFSC, 2013

CNRH. Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003. Anexo I. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003

COELHO, C et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics** v. 46, n. 11–12, p. 3737–3752, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>>.

DEBORTOLI, N et al. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards** v. 86, n. 2, p.814 557–582, 2017.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>

ESPINOZA, J.C. et al. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters** v. 9, n. 12, p. 1–9 , 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>>.1748-9326. Acesso em: 20 de outubro, 2017.

GARCÍA-CUETO, O. R. et al. Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. **Theoretical and Applied Climatology**, 1-16, 2018.

GRIMM, A.M. and TEDESCHI, R.G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate** **22**: 1589–1609, 2009.

GRIMM, A. South American Monsoon and Its Extremes. [S.l.]: **Elsevier Inc.**, 51-93 p. 2019. Disponível em:  
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128092484000030>>.9780128092484. Acesso em: 20 de dezembro, 2018.

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC (p. 1535) 2013.

\_\_\_\_\_ 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.

\_\_\_\_\_ 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

KENDALL, M. Rank correlation methods. 4. ed. London: [s.n.], 1975. 1948 p.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology** 101, p. 121-135, 2010.

LOVINO, M.A. et al. How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina?. **Global and Planetary Change**, 2018.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 215- 226, 2005.

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. In: Ministério do Meio Ambiente. **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. Brasília, 2007.

MARENGO, J.A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>. Acesso em: 23 outubro de 2017.

MARENGO, J.A., 2014. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32.

NOBRE, C.A et al. Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. **Sumário Executivo**. 32 p., 2010.

NÓBREGA, R.S; FARIAS, R.F.L.; SANTOS, C.A.C. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 171-180, junho 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130624>.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K., CANDIDO, D. H. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: Cavalcanti, I. F. A; Ferreira, N. J., Justi da Silva, M. G. A, Silva Dias, M. A. F (eds) **Tempo e Clima no Brasil**. Oficina de Textos, São Paulo, pp 243–258, 2009.

OBREGÓN, G. E MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas. **Relatório** nº 2, MMA. 87 p., 2007.

PEREIRA FILHO, A. J. Análise da escassez hídrica brasileira em 2014. **Revista USP**, n. 104, p. 125-132, 2015.

PINHEIRO, A.; REGINA, G.; DIRCEU, S. Tendências das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia** 28 (3): 281–90, 2013. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000300005>

REGOTO et al. Trends in extreme precipitation over Espírito Santo state - southeast Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, 41. 365-381, 2018. [10.11137/2018\\_1\\_365\\_381](https://doi.org/10.11137/2018_1_365_381)

REBOITA, M.S. et al. Cenários de Mudanças Climáticas Projetados para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, 1, 2018.

SELUCHI, M.E; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. 98 67–77, 2009.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. **Journal of American Statistics Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.<http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

SKANSI, M. et al. 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.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>

VALVERDE, M.C. and MARENGO, J.A. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. **Open Journal of Modern Hydrology** 4 (January): 10–26, 2014 doi:<http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2014.41002>

XAVIER, A. C.; KING, C.W. and SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal Of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659 , 2015. Doi: 10.1002/Joc.4518.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil, Proceedings of the 18th Brazilian Symposium on Remote Sensing, Santos, São Paulo, Brazil. **Conference Paper**, 2017. Disponível em: <http://careyking.com/wp-content/uploads/2017/08/Xavier-et-al-2017-SBSR-Update-of-Brazil-precipitation-gridded-data-set.pdf>. Acesso em: 20 de outubro, 2017.

ZANDONADI, L. et al. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology** , v. 119, p. 01-18, 2015.

ZILLI, M.T et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, 37: 2269–2279, 2016.

ZHANG, X.; ALEXANDER, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, New York, v. 2, n. 6, p. 851-870, 2011.