

Vinícius Bogo Portal Chagas

**MUDANÇAS NOS REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NO
BRASIL, DE 1980 A 2015**

Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Chagas, Vinícius Bogo Portal Chagas
MUDANÇAS NOS REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NO BRASIL,
DE 1980 A 2015 / Vinícius Bogo Portal Chagas Chagas
; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe Chaffe, 2019.
157 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Tendências de
chuva.. 3. Tendências de vazão.. 4. Brasil.. I.
Chaffe, Pedro Luiz Borges Chaffe. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental. III. Título.



“MUDANÇAS NOS REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NO BRASIL, DE 1980 A 2015”

VINÍCIUS BOGO PORTAL CHAGAS

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chalfe
(Orientador)

Prof. Dr. Leonardo Hoinaski

Prof.ª Dr. Marina Hirota

Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl

Prof.ª Dr.ª Maria Eliza Nagel Hassemer
(Coordenadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Pedro pela orientação. Suas sugestões mudaram o rumo e possibilitou a execução deste trabalho.

Agradeço aos integrantes do exame de qualificação e da defesa, professores Davide, Leonardo, Marina, e Roberto. Suas sugestões aumentaram significativamente a qualidade deste trabalho.

Agradeço imensamente às comunidades abertas de *Python* e *R*. Uma quantidade extraordinária de dados exige métodos extraordinários de visualização. E foram estas comunidades que me forneceram a agilidade necessária para construir ferramentas de visualização e manipulação de dados.

Agradeço aos integrantes do Laboratório de Hidrologia, sempre uma grande fonte de motivação. Ao João e Gustavo, pelas divertidas companhias como vizinhos de mesa. À Debora, pelo apoio e pela grande motivação. À Paula e Mafe, companheiras do pessimismo. Ao Pedrinho e à Alena, os motivados mascotes do grupo. À Tássia, pelas conversas da vida. À Camyla, companheira de Mestrado. À Alondra, pela diversão. Ao Tomas, Daniel, e Pablo, pelas trocas de ideias de alto nível. Muito obrigado!

Aos meus pais, obrigado pela ajuda e por terem me oferecido um ótimo lugar para escrever este trabalho.

À Gabriéla, obrigado pelo apoio. Seu suporte me estimula e faz eu sempre querer dar o melhor de mim.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e à Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

RESUMO

A vazão dos rios interage com a integridade ecológica das bacias hidrográficas e é base para o gerenciamento de recursos hídricos. No Brasil, não-estacionariedades nas séries de chuva e vazão são frequentes e interferem na segurança hídrica do país. Entretanto, não-estacionariedades em diversos tributários das maiores bacias do país foram pouco exploradas. Suas causas são incertas, podendo ser resultado da soma de fatores climáticos e não climáticos. Os objetivos deste trabalho foram: (i) avaliar as tendências nos regimes de chuva no Brasil; (ii) avaliar as tendências nos regimes de vazão no Brasil; (iii) investigar as causas das tendências na vazão média, máxima, e mínima anual no Brasil. Foram analisadas tendências em mais de 3000 estações de medição de chuva e vazão pelo Brasil, de 1980 a 2015. As tendências foram investigadas com os testes de Mann-Kendall, Spearman, declividade de Theil-Sen, e regressão de Poisson. A análise de causas das mudanças na vazão se deu com correlação, regressão multivariada, e classificação de bacias. Os resultados mostram que o Sudeste do Brasil e as proximidades do estado de Goiás tiveram predominante reduções nas chuvas médias e maiores intervalos entre chuvas. As mudanças na vazão foram mais frequentes e mais intensas que na chuva. 80,5% das bacias tiveram tendências significativas na vazão média, máxima, ou mínima anual. Reduções na vazão predominaram por todo o Cerrado e Semiárido. Na Amazônia houve aumentos da vazão nas partes norte e oeste; e reduções da vazão na parte sul. Mudanças na vazão média no Brasil foram causadas por, em ordem de importância: mudanças na chuva, demandas hídricas, e mudanças na evapotranspiração. As mudanças na vazão máxima foram associadas a fatores climáticos, i.e., chuva e evapotranspiração, particularmente na escala de tempo mensal. As tendências na vazão mínima foram direcionadas por duas variáveis com pesos semelhantes: fatores climáticos na escala anual, e demanda hídrica da bacia. As mudanças na vazão mínima foram as mais frequentes do país, e também as de maior influência antrópica. A construção de reservatórios e o desflorestamento foram pouco influentes nas mudanças da vazão. Com este trabalho, espera-se contribuir com o monitoramento da condição e da segurança hídrica do Brasil, e com o entendimento do processo de mudanças hidrológicas em regiões tropicais.

Palavras-chave: Tendências de vazão. Tendências de chuva. Brasil.

ABSTRACT

River flows interact with the ecological integrity of river basins and is the foundation for water resources management. In Brazil, nonstationarities in the rainfall and streamflow series are common and interfere with the country's water security. However, nonstationarities in many tributaries of the largest basins of the country were little explored. Its drivers are uncertain and might be a result of climatic and non-climatic factors. The objectives of this work were: (i) to evaluate trends in the rainfall regime in Brazil; (ii) to evaluate trends in the streamflow regime in Brazil; (iii) to investigate the drivers of trends in average, maximum, and minimum annual streamflow in Brazil. I analyzed trends in more than 3000 rainfall and streamflow gauges throughout Brazil, from 1980 to 2015. The trends were investigated with the Mann-Kendall test, Spearman correlation, Theil-Sen slope, and Poisson regression. The trends attribution of river flows was analyzed with correlations, multiple regression, and catchment classification. Results reveal that Southeastern Brazil and the regions close to Goiás had prevailing reduced average rainfall and increased duration between rainfalls. Changes in streamflow were more frequent and more intense than in rainfall. 80.5% of river basins had significant changes in average, maximum, or minimum annual flow. The Cerrado and the Caatinga biomes had reductions in streamflow. The northern and western parts of Amazon had increases in streamflow; and the southern part had decreases in streamflow. Changes in average flow in Brazil were driven by, in descending order of importance: changes in rainfall, water extractions, and changes in evapotranspiration. Changes in maximum flows were associated with climatic factors, i.e., rainfall and evapotranspiration, particularly at the monthly time scale. Trends in minimum flows were driven by variables with similar weights: climatic factor at the annual time scale, and water extraction. Changes in minimum flows were the most common in Brazil, and also the ones with the highest anthropic influence. Reservoir constructions and deforestations had little influence in changes in streamflow. With this work, I aim to contribute to monitoring the condition and security of water resources in Brazil, and with the understanding of the processes that drive hydrological changes in the tropics.

Keywords: Trends in streamflow. Trends in rainfall. Brazil.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** O processo de mudanças no regime de vazão em três etapas: (1) forçantes hidrológicas das mudanças iniciais nas variáveis de entrada e de processamento interno da bacia; (2) propagação das mudanças iniciais na bacia em função dos seus aspectos fisiográficos; (3) mudanças no regime de vazão..... 27
- Figura 2.** Tendências na chuva média, intensa, e de secas, entre aproximadamente 1950 e 2010. Em azul e vermelho são respectivamente tendências significativas de aumento e redução na quantidade de água. **(a)** Mudanças na severidade (i.e., intensidade e duração) das secas meteorológicas segundo Sheffield et al. (2012) e Spinoni et al. (2014). **(b)** Mudanças na chuva média anual segundo Sun et al. (2012) e Soares et al. (2017). **(c)** Frequência de chuvas intensas segundo Zilli et al. (2017). 32
- Figura 3.** Tendências na vazão média anual das maiores bacias hidrográficas do Brasil e as evidências citadas como causas principais. As tendências da vazão diária mínima e máxima anual geralmente acompanharam as tendências da vazão média. O período de análise é a partir da década de 1970. As linhas pretas indicam a América do Sul, as linhas cinza indicam os cursos da água, e os polígonos coloridos indicam a extensão das bacias. 34
- Figura 4.** Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho. 37
- Figura 5.** Localização das 779 estações de medição de vazão usadas neste estudo, classificadas segundo as regiões hidrográficas definidas por ANA (2018). As linhas pretas indicam o limite territorial do Brasil e as linhas cinza os cursos da água. O tamanho do círculo das estações de medição é proporcional à área da bacia hidrográfica. ... 39
- Figura 6.** Localização das 2323 estações de medição de chuva usadas neste estudo, classificadas segundo as regiões hidrográficas definidas por ANA (2018). As linhas pretas indicam o limite territorial do Brasil e as linhas cinza os cursos da água. 40
- Figura 7.** Usos da terra mais frequentes entre os anos 2000 e 2010, segundo Broxton et al. (2014). Os losangos brancos indicam as Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) segundo ANEEL (2018). ... 41
- Figura 8.** Disponibilidade de estações de medição no Brasil, segundo dados da ANA (2018). 42

- Figura 9.** Porcentagem consistido dos dados entre 1980 e 2015 de (a) chuva e (b) vazão, segundo dados da ANA (2018). 43
- Figura 10.** Exemplo do controle de qualidade de dados de chuva a partir de medições vizinhas. A série é da estação pluviométrica 2349005, localizada no estado de São Paulo. A série é identificada como inconsistente após 2012 e foi descartada. 44
- Figura 11.** Exemplo do controle de qualidade dos dados de vazão a partir de (a) curvas de permanência anuais e (b) sua respectiva série temporal diária. Quatro anos das curvas de permanência estão com a vazão ordens de grandeza abaixo das demais e representam algum erro na série de dados. A série temporal mostra que estes erros iniciaram em 2004. A estação fluviométrica usada tem código 64620000, localizada na cidade de Prudentópolis, no Paraná. 45
- Figura 12.** (a) Exemplo da identificação de eventos de cheia (i.e., eventos com vazão diária acima do percentil 90). São identificadas três cheias, sendo uma delas do agrupamento de dois eventos dependentes. (b) Identificação de eventos de seca hidrológica (i.e., com vazão abaixo do percentil 10, a partir da média móvel de 7 dias). Dois eventos são considerados curtos e não contabilizados no número de secas. A série de vazão é de 2007, do rio Negro, afluente do rio Iguaçú no norte de SC. 51
- Figura 13.** Exemplo do Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) da vazão (a) do rio Guaporé e (b) do rio Corumbataí. As vazões são de 2010. 53
- Figura 14.** Localização das (a) 779 estações medição de vazão antes da homogeneização da distribuição espacial de bacias e (b) 354 estações após a homogeneização. Sobreposição das áreas das bacias (c) antes e (d) após a homogeneização. 67
- Figura 15.** (a) Dispersão entre os p-valores das tendências na vazão média anual de Theil-Sen e de Mann-Kendall de todas as bacias. (b) Dispersão entre os p-valores das tendências na vazão média anual de Theil-Sen e de Spearman de todas as bacias. 71
- Figura 16.** Tendências de Theil-Sen da (a) chuva média anual, (b) desvio padrão da chuva diária, (c) sazonalidade da chuva média, e (d) centroide da chuva diária. Os símbolos preenchidos indicam tendências significativas para o nível de 95%. Os boxplots representam as tendências de cada região hidrográfica, coloridos

segundo a Figura 6. A barra intermediária dos boxplots indicam a mediana, as caixas indicam os percentis 25 e 75, e os bigodes têm extensão máxima de duas vezes o intervalo entre quartis. Para melhor visualização, outliers não foram inclusos nos boxplots. AL significa região hidrográfica do Atlântico Leste; AM da bacia do Amazonas; AN do Atlântico Norte; AS do Atlântico Sul; PR da bacia do Paraná; SF da bacia do São Francisco; TO da bacia do Tocantins-Araguaia; UR da bacia do Uruguai..... 72

Figura 17. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão média anual, (b) autocorrelação da vazão diária, (c) sazonalidade da vazão média, e (d) centroide da vazão diária. Os símbolos preenchidos indicam tendências significativas para o nível de 95%. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza. A descrição dos boxplots é a mesma da Figura 16..... 74

Figura 18. Tendências de Theil-Sen da (a) chuva diária máxima anual, (b) dia da chuva máxima de uma média móvel de 5 dias, (d) chuva intensa de maior duração do ano. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de chuvas intensas. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 16. 77

Figura 19. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão diária máxima anual, (b) dia da vazão diária máxima anual, e (d) cheia de maior duração do ano. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de cheias. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 17. 78

Figura 20. Tendências de Theil-Sen da (a) chuva média entre os percentis 0 e 20, (b) dia do início do evento sem chuva de maior duração do ano, e (d) duração média anual dos eventos sem chuva. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de eventos sem chuva. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 16. 80

Figura 21. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (b) dia da vazão mínima da média móvel de 7 dias, e (d) duração média anual das secas hidrológicas. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de secas hidrológicas. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 17. 81

Figura 22. Tendências na vazão média anual (ΔQ_{med}), na máxima diária anual (ΔQ_{max}), e na mínima anual da média móvel de 7 dias (ΔQ_{min}). Tendências significativas (Theil-Sen, alpha de 0,05) de aumento (+), de redução (-), ou não significativas (o) são

representadas pela sequência bivariada de cores para a ΔQ_{\max} e ΔQ_{\min} ; e são representadas pelo formato do símbolo para a ΔQ_{med} . O tamanho do símbolo indica a área da bacia. 83

Figura 23. Tendências na chuva média anual (ΔP_{med}), na máxima diária anual (ΔP_{max}), e na duração média anual dos eventos sem chuva ($\Delta P_{\text{dur_sec}}$). Tendências significativas (Theil-Sen, alpha de 0,05) de aumento (+), de redução (-), ou não significativas (o) são representadas pela sequência bivariada de cores para a ΔP_{max} e $\Delta P_{\text{dur_sec}}$; e são representadas pelo formato do símbolo para a ΔP_{med} . O tamanho do símbolo é proporcional à distância até a estação de medição mais próxima. 84

Figura 24. Número de índices com tendência significativa das estações de medição de (a) chuva e (d) vazão. Quantidade de índices com tendência significativa indicando mais água para as estações de (b) chuva e (e) vazão; e indicando menos água para (c) chuva e (f) vazão. As tendências são as mesmas das Figuras 16 a 21. A descrição dos boxplots é a mesma da Figura 16. 86

Figura 25. Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão média anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. 90

Figura 26. Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão média anual. 92

Figura 27. Correlações de Spearman entre as tendências na vazão média anual e os índices das suas forçantes hidrológicas. 93

Figura 28. Diagnóstico da regressão das tendências da vazão média anual. (a) ΔQ_{med}^* modelado em função do ΔQ_{med}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{med}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados. 94

Figura 29. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão média anual (ΔQ_{med}) e na chuva média anual (ΔP_{med}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A core do símbolo varia segundo: (a) tendência na evapotranspiração média anual; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais. 95

- Figura 30.** Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{med} e ΔP_{med} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes. 96
- Figura 31.** Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{med} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial para as bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A escala bivariada de cores representa DMD (baixas: abaixo de 10%; médias: entre 10 e 30%, altas: acima de 30%) e ΔET_{med} significativa (Theil-Sen, $\alpha = 0,05$) de aumento (+), redução (-), ou não significativa (o). Os símbolos representam ΔFN (abaixo de -20% (-), entre -20 e 20% (o), e acima de 20% (+)) e ΔUHE (construção de nova hidrelétrica (+) ou ausência de novas construções (o))..... 97
- Figura 32.** Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão diária máxima anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados..... 98
- Figura 33.** Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão máxima anual. 99
- Figura 34.** Correlações de Spearman entre as tendências na vazão diária máxima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas. 100
- Figura 35.** Diagnóstico da regressão das tendências da vazão diária máxima anual. (a) ΔQ_{max}^* modelado em função do ΔQ_{max}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{max}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados. 101
- Figura 36.** Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{max} e ΔPET_{7d} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes. 102
- Figura 37.** Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{max} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial das bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A descrição da legenda de cores e símbolos é a mesma da Figura 31. 102
- Figura 38.** Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão mínima anual da média móvel de 7 dias. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. 103

Figura 39. Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão mínima anual.	104
Figura 40. Correlações de Spearman entre as tendências na vazão mínima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.	104
Figura 41. Diagnóstico da regressão das tendências da vazão mínima anual. (a) ΔQ_{min}^* modelado em função do ΔQ_{min}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{min}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados.....	105
Figura 42. ΔQ_{min}^* modelado em função do ΔQ_{min}^* observado. A cor do símbolo indica a mediana da série anual de sazonalidade da vazão média da bacia.	106
Figura 43. Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{min} e ΔPET_{365d} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes.	107
Figura 44. Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{min} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial das bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A descrição da legenda de cores e símbolos é a mesma da Figura 31.....	107
Figura C1. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva média anual, (b) desvio padrão da vazão diária, (c) sazonalidade da chuva média, e (d) centroide do tempo da chuva diária. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas.	141
Figura C2. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão média anual, (b) autocorrelação da vazão diária, (c) sazonalidade da vazão média, e (d) centroide do tempo da vazão diária. Bacias maiores que 30 km ² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza.	142
Figura D1. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva diária máxima anual, (b) dia da chuva máxima de uma média móvel de 5 dias, (c) frequência anual de chuvas intensas, e (d) chuva intensa de maior duração do ano. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas.	143

- Figura D2.** Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão diária máxima anual, (b) dia da vazão diária máxima anual, (c) frequência anual de cheias, e (d) cheia de maior duração do ano. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza..... 144
- Figura E1.** Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva média entre os percentis 0 e 20, (b) dia de início do evento sem chuva de maior duração, (c) frequência anual de eventos sem chuva, e (d) duração média anual dos eventos sem chuva. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas..... 145
- Figura E2.** Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (b) dia da vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (c) frequência anual de secas hidrológicas, e (d) duração média anual das secas hidrológicas. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza..... 146
- Figura F1.** (a) Mediana da série anual de 1980 a 2015 da evapotranspiração média anual. Tendência de Theil-Sen da evapotranspiração média anual em (b) mm por ano e (c) porcentagem da evapotranspiração mediana por ano. As tendências com símbolo preenchido são significativas para alpha de 0,05. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. 147
- Figura F2.** (a) Geração elétrica e anos de construção das Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE). Número de UHEs construídas por bacia (b) antes de 1980 e (c) entre 1980 e 2015. Geração elétrica por bacia das UHEs construídas (d) antes de 1980 e (e) entre 1980 e 2015. 147
- Figura F3.** (a) Demandas hídricas de 2015 por microbacia segundo a fonte dos dados (ANA, 2015). Demanda hídrica de 2015 por bacia (b) em mm por ano e (c) em porcentagem da vazão média anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados..... 148
- Figura F4.** Cobertura de florestas naturais de cada bacia em (a) 1985 e (b) 2015. (c) Diferenças nas coberturas florestais entre 1985 e 2015, onde o tamanho do círculo indica a área da bacia..... 148
- Figura F5.** Mediana da série anual do balanço de chuva menos evapotranspiração de: (a) 7 dias antes dos eventos da vazão máxima

anual; (b) 30 dias antes dos eventos da vazão máxima; (c) 90 dias antes dos eventos da vazão mínima; e (d) 365 dias antes dos eventos da vazão mínima. (e)-(h): mediana dos valores absolutos de (a)-(e). Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. 149

Figura G1. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão média anual e os índices das suas forçantes hidrológicas. 151

Figura G2. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão diária máxima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas..... 151

Figura G3. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão mínima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas. 152

Figura H1. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{med}^* em função das variáveis independentes (a) ΔP_{med}^* , (b) ΔET_{med}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* 153

Figura H2. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{max}^* em função das variáveis independentes (a) ΔPET_{7d}^* , (b) ΔPET_{30d}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* 153

Figura H3. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{min}^* em função das variáveis independentes (a) ΔPET_{90d}^* , (b) ΔPET_{365d}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* 154

Figura I1. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão diária máxima anual (ΔQ_{max}) e no balanço de chuva e evapotranspiração 7 dias antes da máxima (ΔPET_{7d}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A cor do símbolo varia segundo: (a) tendência no balanço de chuva e evapotranspiração 30 dias antes da máxima; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais. 155

Figura I2. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão mínima anual (ΔQ_{min}) e no balanço de chuva e evapotranspiração 365 dias antes da mínima (ΔPET_{365d}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A cor do símbolo varia segundo: (a) tendência no balanço de chuva e evapotranspiração 90 dias antes da mínima; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais. 156

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** O regime de vazão dividido em categorias segundo as condições de vazão. Para cada subcategoria segue o exemplo de um índice..... 26
- Tabela 2.** Índices usados para avaliar as mudanças no regime de vazão, de acordo com as onze subcategorias do regime. 48
- Tabela 3.** Índices usados para avaliar as mudanças no regime de chuva, de acordo com as onze subcategorias do regime. 49
- Tabela 4.** Variáveis incluídas na análise de causas das tendências na vazão média anual, vazão diária máxima anual, e vazão mínima anual de 7 dias. As tendências na vazão representam as variáveis dependentes. As forçantes hidrológicas representam as variáveis independentes. Δ significa tendência ou mudança; Q significa vazão; P significa chuva; ET significa evapotranspiração; FN significa florestas naturais; e UHE significa Usinas Hidrelétricas de Energia. 62
- Tabela 5.** Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão média anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001. 93
- Tabela 6.** Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão diária máxima anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001..... 100
- Tabela 7.** Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão mínima anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001. 105
- Tabela A1.** Estações pluviométricas descartadas ou alteradas com o controle de qualidade de dados. 133
- Tabela B1.** Estações fluviométricas descartadas ou alteradas com o controle de qualidade de dados. 137

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A:** Séries temporais diárias, gráficos do controle de qualidade, e coordenadas das 2323 estações pluviométricas aprovadas pelo controle de qualidade.
- Anexo B:** Séries temporais diárias, gráficos do controle de qualidade, e coordenadas das 63 estações pluviométricas descartadas pelo controle de qualidade.
- Anexo C:** Séries temporais diárias, gráficos do controle de qualidade, e coordenadas das 779 estações pluviométricas aprovadas pelo controle de qualidade.
- Anexo D:** Séries temporais diárias, gráficos do controle de qualidade, e coordenadas das 23 estações pluviométricas descartadas pelo controle de qualidade.
- Anexo E:** Limites das 779 bacias hidrográficas.
- Anexo F:** Séries temporais anuais e tendências dos índices de chuva das 2323 estações pluviométricas.
- Anexo G:** Séries temporais anuais e tendências dos índices de vazão das 779 estações pluviométricas.
- Anexo H:** Séries temporais anuais e tendências de chuva e evapotranspiração média das bacias hidrográficas.
- Anexo I:** Séries temporais anuais e tendências dos balanços de chuva e evapotranspiração dos eventos de vazão máxima e mínima das bacias hidrográficas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVO GERAL.....	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	O REGIME DE VAZÃO E POSSÍVEIS CAUSAS DE SUAS MUDANÇAS	25
2.2	MUDANÇAS GLOBAIS NOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO	28
2.3	MUDANÇAS GLOBAIS NA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO MÉDIA	30
2.4	TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL.....	31
2.5	TENDÊNCIAS DE VAZÃO NO BRASIL	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	ÁREA DE ESTUDO	38
3.2	SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO E DO PERÍODO DE ANÁLISE.....	41
3.3	CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS.....	42
3.4	DELIMITAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	46
3.5	ÍNDICES DE CHUVA E VAZÃO.....	46
3.5.1	Frequência e duração das cheias e das secas.....	47
3.5.2	Sazonalidade	51
3.5.3	Taxa de variação	54
3.6	CÁLCULO DAS TENDÊNCIAS.....	54
3.6.1	Teste de Mann-Kendall	55
3.6.2	Declividade de Theil-Sen.....	56
3.6.3	Correlação de Spearman	57
3.6.4	Regressão de Poisson	58
3.6.5	Pre-whitening.....	58
3.6.6	Reamostragem usando <i>bootstrap</i>	59
3.7	ANÁLISE DE CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO .	61
3.7.1	Escolha e cálculo dos índices das forças hidrológicas	61
3.7.1.1	Índices dos fatores climáticos.....	63
3.7.1.2	Índices dos fatores não climáticos.....	65
3.7.2	Homogeneização da distribuição espacial das bacias ...	66
3.7.3	Relações entre tendências de vazão e forças hidrológicas.....	66

4	RESULTADOS DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA E VAZÃO	71
4.1	Tendências nos índices de condições médias	72
4.2	Tendências nos índices de condições altas	76
4.3	Tendências nos índices de condições baixas	79
4.4	Balanco geral das tendências de chuva e vazão.....	82
5	DISCUSSÃO DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA E VAZÃO	87
6	RESULTADOS DA ANÁLISE DE CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO	89
6.1	VAZÃO MÉDIA ANUAL	89
6.1.1	Descrição das variáveis.....	89
6.1.2	Transformação das variáveis	91
6.1.3	Correlação e regressão multivariada.....	92
6.1.4	Classificação de bacias	95
6.2	VAZÃO MÁXIMA ANUAL	98
6.2.1	Descrição das variáveis.....	98
6.2.2	Transformação das variáveis	99
6.2.3	Correlação e regressão multivariada.....	99
6.2.4	Classificação de bacias	101
6.3	VAZÃO MÍNIMA ANUAL.....	103
6.3.1	Variáveis.....	103
6.3.2	Transformação das variáveis	103
6.3.3	Correlação e regressão multivariada.....	104
6.3.4	Classificação de bacias	106
7	DISCUSSÃO DAS CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO	109
8	CONCLUSÕES	111
8.1	TENDÊNCIAS NO REGIME DE CHUVAS	111
8.2	TENDÊNCIAS NO REGIME DE VAZÃO.....	111
8.3	CAUSAS DAS TENDÊNCIAS NA VAZÃO MÉDIA, MÁXIMA, E MÍNIMA ANUAL	112
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE A: ESTAÇÕES DE CHUVA DESCARTADAS OU ALTERADAS COM O CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS		133
APÊNDICE B: ESTAÇÕES DE VAZÃO DESCARTADAS OU ALTERADAS COM O CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS		137

APÊNDICE C: MEDIANA DA SÉRIE ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES MÉDIAS	141
APÊNDICE D: MEDIANA ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES ALTAS.....	143
APÊNDICE E: MEDIANA ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES BAIXAS	145
APÊNDICE F: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS FORÇANTES HIDROLÓGICAS DE ΔQ_{MED}, ΔQ_{MAX}, E ΔQ_{MIN}	147
APÊNDICE G: GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS FORÇANTES HIDROLÓGICAS DE ΔQ_{MED}, ΔQ_{MAX}, E ΔQ_{MIN}	151
APÊNDICE H: GRÁFICOS DIAGNÓSTICO DA REGRESSÃO DE ΔQ_{MED}, ΔQ_{MAX}, E ΔQ_{MIN}	153
APÊNDICE I: GRÁFICOS DE DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	155

1 INTRODUÇÃO

A vazão de um rio e sua dinâmica interage com a integridade ecológica da bacia hidrográfica, a evolução do relevo, e é base do gerenciamento dos recursos hídricos para uso socioeconômico (POFF et al., 1997). Padrões temporais da dinâmica da vazão ao longo de décadas definem o regime de vazão das bacias hidrográficas (RICHTER et al., 1996). O regime de vazão está em permanente mudança em todas as bacias, quer seja na escala de tempo geológica, climática, ou ecológica (TROCH et al., 2015). Estas não-estacionariedades das séries de vazão podem ocorrer em menos de uma década (MILLY et al., 2008), levando a sociedade e os fatores ecológicos à necessidade de adaptação às novas condições (OKI; KANAE, 2006; MONTANARI et al., 2013).

Nas últimas décadas, houve significativas mudanças no regime de vazão em várias regiões do mundo (e.g., MILLIMAN et al., 2008; LI et al., 2017). No Brasil, os rios Paraná, Paraguai, e Uruguai, que formam a bacia da Prata, tiveram um dos maiores aumentos do mundo na vazão média no último século (PIAO et al., 2007). Houve substancial aumento na disponibilidade hídrica dos rios Solimões (VILLAR et al., 2009) e Tocantins-Araguaia (COE et al., 2011); e redução nos tributários do sul do rio Amazonas, i.e., nos rios Xingu, Tapajós, e Madeira (VILLAR et al., 2009).

Os trabalhos que analisaram as não-estacionariedades da vazão no Brasil não investigaram (i) um período em comum; (ii) os extensos bancos de dados dos tributários das maiores bacias; e (iii) um grande conjunto de características da série de vazão. A ausência do estudo de todo o território brasileiro com um período de análise em comum impossibilita comparações diretas entre as bacias, pois não-estacionariedades variam substancialmente segundo o período analisado (HALL et al., 2014). A não inclusão dos tributários das maiores bacias pode estar deixando de revelar diversas não-estacionariedades, pois as menores bacias possuem as maiores mudanças em algumas características da vazão, como as cheias (CHAGAS; CHAFFE, 2018). Além disso, como não foi analisado um conjunto de componentes da vazão, como sazonalidade, cheias, e secas, não se conhece quais aspectos da vazão mais mudaram no Brasil.

Causas do comportamento não-estacionário da vazão podem ser climáticas, como mudanças na precipitação ou na evapotranspiração; ou não climáticas, como mudanças na cobertura da terra ou construção de obras hidráulicas (KUNDZEWICZ; GERTEN, 2015). Estas causas não são independentes e agem em paralelo na maior parte das bacias (MERZ

et al., 2012). Mudanças no regime de vazão no Brasil foram geralmente associadas a intensas mudanças na cobertura da terra (e.g., COSTA et al., 2003), construção de reservatórios para a geração de energia hidrelétrica (e.g., STEVAUX et al., 2009), ou variabilidade climática (e.g. COLLISCHONN et al., 2001). Porém, segundo Wohl et al. (2012), nas regiões tropicais ainda há grande lacuna sobre como ocorrem as mudanças na vazão, particularmente em ambientes com interferências antrópicas. A complexidade dos processos hidrológicos nestas regiões sugere que não-estacionariedades da vazão de regiões tropicais podem ter causas e intensidades distintas das temperadas (WOHL et al., 2012).

Não há estudos que tenham investigado o que causou as mudanças de vazão em todo o Brasil, que tenham considerado as maiores bacias e também seus tributários, e que tenham considerado um conjunto de características da série de vazão. A maior parte dos trabalhos que analisaram causas das mudanças da vazão no Brasil não consideraram múltiplas causas dos fatores climáticos e não climáticos. Como as causas agem paralelamente (MERZ et al., 2012), estes trabalhos podem deixar de notar mudanças na vazão ocasionadas por uma soma de fatores.

Neste trabalho foram analisadas não-estacionariedades entre 1980 e 2015 em um conjunto de índices em 779 estações de medição de vazão e 2323 de chuva em todo o Brasil. A maior parte das bacias foram analisadas em escala regional pela primeira vez. Adicionalmente, foram investigadas múltiplas causas que possam ter levado às mudanças na vazão média anual, na vazão máxima anual, e na vazão mínima anual. A hipótese investigada é de que cinco variáveis possam ter causado as mudanças na vazão no Brasil: mudanças na chuva; mudanças na evapotranspiração; mudanças na cobertura de florestas; construção de hidrelétricas; e captação de água pela sociedade.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as tendências nos regimes de chuva e vazão no Brasil e suas possíveis causas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Avaliar as tendências nos regimes de chuva no Brasil.
- (ii) Avaliar as tendências nos regimes de vazão no Brasil.
- (iii) Investigar as causas das tendências na vazão média, máxima, e mínima anual no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O REGIME DE VAZÃO E POSSÍVEIS CAUSAS DE SUAS MUDANÇAS

Uma bacia hidrográfica pode ser interpretada como um sistema que transforma chuva em vazão. Considerando a escala anual e o ano hidrológico, este sistema tem como entrada a precipitação e como saída a vazão e a evaporação, caso a movimentação da água subterrânea profunda for desprezada (CHOW et al., 1988). Os demais processos hidrológicos são processos internos à bacia, como a interceptação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo (CHOW et al., 1988). Estes processos internos são definidos por fluxos e por armazenamentos da água, controlados pelos aspectos físicos da bacia, como cobertura florestal, morfometria do relevo, porosidade do solo, entre outros (TETZLAFF et al., 2013; HORNBERGER et al., 2014). Os processos internos definem o comportamento hidrológico das bacias e as diferentes respostas da vazão aos eventos de chuva (WAGENER et al. 2013).

Há uma corrente de trabalhos que define o regime de vazão como um conceito relativo à sazonalidade da vazão (SHAW et al., 2010). Uma outra corrente de trabalhos, relacionada às interações entre ecologia e hidrologia, define o regime de vazão como as características da série de vazão que formam um padrão ao longo dos anos (e.g., 20 ou mais anos; RICHTER et al., 1996; POFF et al., 1997). Com isso, segundo Poff et al. (1997), o regime de vazão pode ser dividido em cinco categorias: magnitude, frequência, duração, taxa de variação, e sazonalidade. A taxa de variação refere-se ao quão rapidamente a vazão muda de uma magnitude para outra. A sazonalidade refere-se à previsibilidade da época do ano em que ocorrem vazões de determinadas magnitudes. Para considerar ambas as condições médias e as condições extremas, as categorias são divididas em subcategorias (Tabela 1) segundo condições de vazões médias, altas, e baixas. Assim, o regime de vazão possui 11 subcategorias, que são analisadas através de índices e geralmente consideram a escala diária, mensal, ou anual. O conceito de regime de vazão adotado neste trabalho é o da divisão da vazão nestas 11 subcategorias.

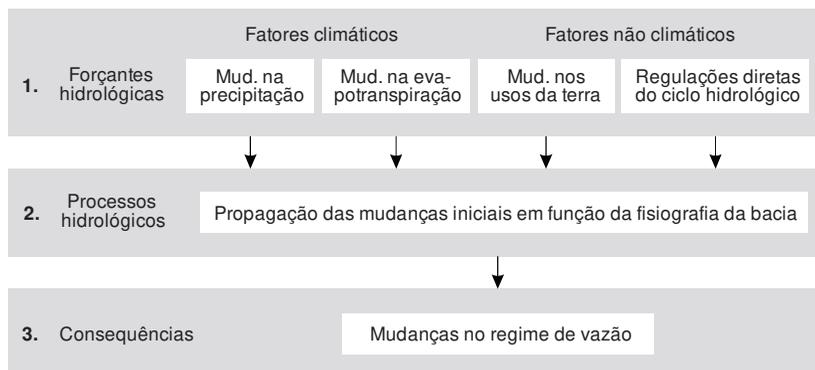
Tabela 1. O regime de vazão dividido em categorias segundo as condições de vazão. Para cada subcategoria segue o exemplo de um índice.

Categoria	Subcategoria	Exemplo de um índice
Magnitude	Médias	Vazão média anual
	Altas	Vazão diária máxima anual
	Baixas	Vazão diária mínima anual
Frequência	Altas	Frequência de cheias
	Baixas	Frequência de secas hidrológicas
Duração	Altas	Duração das cheias
	Baixas	Duração das secas hidrológicas
Taxa de variação	Médias	Suavidade das mudanças no hidrograma
Sazonalidade	Médias	Sazonalidade das vazões mensais
	Altas	Sazonalidade das cheias
	Baixas	Sazonalidade das secas hidrológicas

De forma simplificada, o processo de mudança no regime de vazão pode ser dividido em três etapas (Figura 1). Na primeira etapa uma forçante altera alguma variável da bacia, seja na entrada ou nos processos internos, levando à perda do equilíbrio observado antes da alteração. Neste trabalho, as forçantes desta primeira etapa serão chamadas de forçantes hidrológicas, pois são responsáveis por iniciar o processo de mudanças no regime de vazão. Segundo Kundzewicz e Gerten (2014), as forçantes hidrológicas podem ser divididas em dois grupos: (i) fatores climáticos e (ii) fatores não climáticos. Os fatores climáticos podem ser mudanças no regime de precipitação ou de evapotranspiração (Figura 1). Mudanças no regime de evapotranspiração dependem de variáveis como o vento, temperatura, umidade relativa do ar, e concentração de CO₂ na atmosfera (HORNBERGER et al., 2014). No caso das mudanças no regime de precipitação, variabilidades podem ser resultado de fenômenos de larga escala, como o El Niño (GRIMM, 2011), a Oscilação Decenal do Pacífico (SEAGER et al., 2010), e a Oscilação Multidecenal do Atlântico (KAYANO; CAPISTRANO, 2014). Além disso, o desflorestamento em larga escala pode levar à redução da umidade originária da evapotranspiração para a reciclagem da precipitação, alterando o regime de precipitação (COSTA, 2005; ELLISON et al., 2012; SALAZAR et al., 2015).

As forçantes hidrológicas não climáticas das mudanças no regime de vazão são divididas em mudanças na cobertura da terra e regulações diretas do ciclo hidrológico (KUNDZEWICZ; GERTEN, 2014). Nas mudanças na cobertura da terra se destacam a substituição da vegetação nativa por pastagens, culturas agrícolas, ou cidades, modificando principalmente as taxas de evapotranspiração, infiltração, armazenamento da água no solo, e escoamento superficial (BRUIJNZEEL, 2004). Regulações diretas no ciclo hidrológico incluem construção de reservatórios, captação de água para uso urbano, irrigação, transposição, entre outros.

Figura 1. O processo de mudanças no regime de vazão em três etapas: (1) forçantes hidrológicas das mudanças iniciais nas variáveis de entrada e de processamento interno da bacia; (2) propagação das mudanças iniciais na bacia em função dos seus aspectos físiográficos; (3) mudanças no regime de vazão.



Em uma segunda etapa do processo de mudanças no regime de vazão (Figura 1), as características físicas da bacia respondem às mudanças observadas na primeira etapa, i.e., às forçantes hidrológicas. Também pode ser entendido como se as mudanças iniciais fossem propagadas pela bacia. Cada bacia pode amplificar ou atenuar as mudanças iniciais, modificar seu tempo de resposta e sua intensidade (VAN LOON, 2015). Desta maneira, os aspectos fisiográficos servem como um controle que define a sensibilidade das bacias às forçantes hidrológicas. Por exemplo, sob as mesmas condições climáticas, bacias com maiores umidades do solo tendem a responder rapidamente às chuvas intensas, pois tendem a atingir o ponto de saturação mais rapidamente (BLÖSCHL et al., 2015). Outro exemplo é que bacias grandes possuem maiores tempos de residência da água e,

consequentemente, tempos de resposta mais lentos aos eventos de chuva (TETZLAFF et al., 2009) com a atenuação das vazões de pico (BLÖSCHL et al., 2007; VIGLIONE et al., 2016).

A terceira etapa das mudanças no regime de vazão é aquela em que as mudanças são efetivamente notadas na vazão. O desafio desta etapa é encontrar métricas que efetivamente representem os processos hidrológicos (MCMILLAN et al., 2017) e as categorias do regime de vazão, sem que sejam excessivamente simplificadas ou correlacionadas (OLDEN; POFF, 2003).

A esquematização das mudanças do regime de vazão da Figura 1 é apenas uma simplificação. As três etapas não são independentes entre si, havendo complexas interações entre seus componentes. Uma das interações mais notáveis é a de mudanças na cobertura da terra, particularmente o desflorestamento em larga escala. Ao mesmo tempo que estes desflorestamentos são forçantes hidrológicas de fatores não climáticos, também podem levar a mudanças regionais no clima (SALAZAR et al., 2015), agindo indiretamente como forçantes hidrológicas climáticas. Bacias com maior ocupação de florestas podem ter respostas atenuadas das mudanças no regime de chuvas (CHAGAS; CHAFFE, 2018). E, somado a isto, o desflorestamento está vinculado ao aumento de atividades antrópicas, possibilitando maiores regulações diretas no ciclo hidrológico. Portanto, neste exemplo, grandes desflorestamentos podem agir em todas as etapas das mudanças do regime de vazão: diretamente, como um dos componentes da primeira etapa da Figura 1, i.e., como uma forçante hidrológica não climática a partir de mudanças nos usos da terra; indiretamente, a partir dos três demais componentes das forçantes hidrológicas; e indiretamente a partir de alterações na fisiografia da bacia, que definem a propagação das forçantes hidrológicas.

2.2 MUDANÇAS GLOBAIS NOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO

As mudanças climáticas observadas nas últimas décadas foram resultado da soma de variabilidades naturais e de interferências antrópicas. Segundo a equação de Clausius-Clapeyron, a cada 1°C de aumento na temperatura espera-se 7% de aumento na capacidade do ar de reter umidade (TRENBERTH, 2011). Com o aumento da temperatura média a atmosfera é alimentada com mais umidade, podendo levar ao aumento dos eventos de chuvas intensas. O aumento da temperatura média também pode levar à maior evaporação da água do solo e,

possivelmente, à intensificação dos eventos de seca (TRENBERTH, 2011). Portanto, com os aumentos observados na temperatura média são esperadas maiores cheias e maiores secas. Assim, já não se espera mais a estacionariedade dos regimes de chuva e de vazão pelo globo (MILLY et al., 2008).

A não-estacionariedade observada nas séries de chuva e vazão no globo não seguem fielmente a lógica da equação de Clausius-Clapeyron. Apesar do aumento da temperatura média, a média global das tendências da chuva diária máxima anual e no número de dias com chuvas intensas é aproximadamente igual a zero entre 1951 a 2011 (DONAT et al., 2013). O único índice de chuvas intensas com aumento significativo foi a contribuição anual das chuvas acima do percentil 95, o qual teve aumento de 1,98 mm por década (DONAT et al., 2013). Com isso, sugere-se maior aumento não da chuva mais intensa do ano, mas daquelas associadas ao segundo ou terceiro evento mais extremo do ano.

Estudos investigando tendências na magnitude das cheias pelo globo foram inconclusivas (KUNDZEWICZ et al., 2013). Segundo Blöschl et al. (2015), ao invés de seguir tendências lineares, as vazões máximas anuais seguem um padrão de ciclicidade interanual, com as maiores cheias anuais concentradas em anos próximos. Conforme Mallakpour e Villarini (2016) mostraram para os EUA, pode estar havendo aumentos na frequência das cheias ao invés de em suas magnitudes.

Avaliando a não-estacionariedade da ocorrência de secas no mundo, há grande debate devido às incertezas originadas nas estimativas de evapotranspiração (TRENBERTH et al., 2013; MILLY; DUNNE, 2016). Apesar da evapotranspiração não ser a variável que inicia as secas, ela pode intensificar as suas severidades e prolongar as suas durações (VAN LOON, 2015). Sheffield et al. (2012) calcularam a tendência global das secas de 1980 a 2008 usando o Índice de Severidade de Secas de Palmer (PDSI, em inglês). Para isso, utilizaram duas metodologias de estimativa de evapotranspiração: a equação de Thornthwaite, que utiliza a temperatura como entrada; e a equação de Penman-Monteith, que considera também a umidade relativa do ar, vento, e radiação solar incidente. Com a equação de Thornthwaite, Sheffield et al. (2012) encontraram aumentos estatisticamente significativos das secas no globo. Porém, com a equação de Penman-Monteith, tal estudo não encontrou tendências significativas. Com isso, considerando que a equação de Penman-Monteith é fisicamente mais realista, Sheffield et al. (2012) concluíram que não há mudança na média global das secas desde 1980.

Estudos de tendências de secas possuem resultados diferentes dependendo do período estudado e das variáveis consideradas. Em outro estudo relacionado às secas, Spinoni et al. (2014) calcularam tendências em componentes como frequência, duração, e severidade usando o Índice de Precipitação Padronizado (SPI, em inglês) entre 1951 e 2010. O SPI usa apenas a precipitação mensal como variável. Portanto, as incertezas da evapotranspiração não foram incluídas. Spinoni et al. (2014) encontraram que a maior parte do globo teve reduções nos componentes das secas, particularmente em suas durações. Donat et al. (2013), em concordância com Spinoni et al. (2014) mas considerando o número de dias consecutivos sem chuva, também encontraram redução substancial na duração das secas entre 1951 e 2010.

2.3 MUDANÇAS GLOBAIS NA PRECIPITAÇÃO E VAZÃO MÉDIA

Entre 1940 e 2010, a tendência na precipitação média anual global foi de aproximadamente zero (MILLIMAN et al., 2008; SUN et al., 2012; DONAT et al., 2013). Tal resultado está de acordo com as tendências de vazão do mesmo período, na qual Milliman et al. (2008) apontaram que a vazão média de 137 grandes rios globais também não apresentou tendência significativa. Segundo Dai et al. (2009), entre 1948 e 2004 um terço das 200 maiores bacias teve tendências significativas. Por outro lado, se considerar o período que abrange todo o século XX, há evidências de aumentos significativos na vazão média (GERTEN et al., 2007; PIAO et al., 2007). Entre 1900 e 2000 houve aumento de $0,17 \text{ mm ano}^{-1}$ na vazão média dos rios no globo (PIAO et al., 2007). Investigando as causas deste aumento com o modelo biogeoquímico ORCHIDEE, Piao et al. (2007) estimaram que entre 50 e 55% do aumento da vazão ocorreu devido à redução na evapotranspiração com o desflorestamento. O restante do aumento da vazão foi atribuído às mudanças na precipitação.

Para entender melhor as mudanças de vazão no século XX, Sterling et al. (2013) avaliaram a redução na evapotranspiração mais detalhadamente. Usaram mais de 1500 estimativas de evapotranspiração encontradas na literatura. Seus resultados indicam que, até 2012, a redução da vegetação nativa global reduziu a evapotranspiração global média em cerca de 5%. Aproximadamente metade desta redução foi causada pela implantação do plantio não irrigado, e a outra metade pela pecuária. Além disto, a cultura irrigada e a construção de reservatórios

contribuíram com um aumento da evapotranspiração dos continentes em 1% (STERLING et al., 2013).

Considerando apenas o período de 1982 a 2012, Zhang et al. (2016) tiveram resultados opostos aos de Sterling et al. (2013): aumento na evapotranspiração média global em cerca de $0,5 \text{ mm ano}^{-1}$. Zhang et al. (2016) usaram o modelo de Penman-Monteith-Leuning, para estimar que esta mudança foi direcionada por aumentos na transpiração da vegetação e na evaporação da chuva interceptada pela vegetação. A causa disto está no aumento do índice de área foliar (LAI) médio global, atribuído ao aumento da temperatura, do CO_2 na atmosfera, do uso de fertilizantes, da proteção florestal, e da produtividade agrícola (ZHANG et al., 2016). Portanto, como estas variáveis têm previsão de aumento no século XXI, espera-se que a evapotranspiração global continue aumentando (ZHANG et al., 2016).

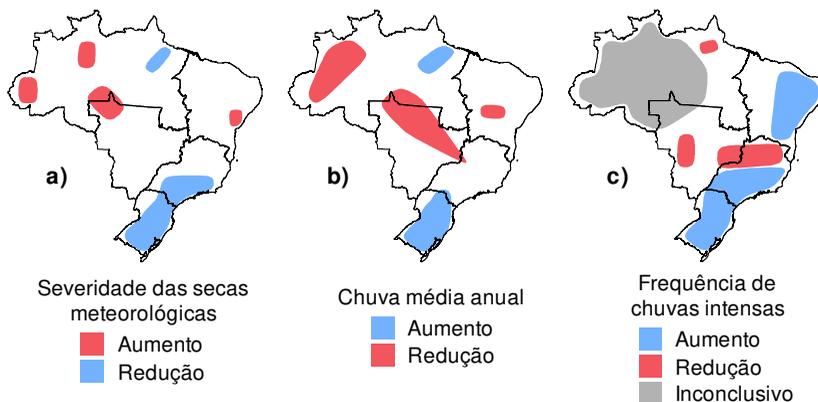
Em busca de variáveis que expliquem a variabilidade espacial das tendências na chuva e vazão, Greve et al. (2014) investigaram o paradigma existente de que “os ambientes úmidos ficarão mais úmidos, e os ambientes secos mais secos”. Utilizando dados de precipitação e evapotranspiração da segunda metade do século XX, observou-se que este paradigma não é verdadeiro (GREVE et al., 2014). Aproximadamente 75% da superfície terrestre não teve mudanças significativas na precipitação e evapotranspiração, sendo que apenas 11% teve o paradigma confirmado e 14% teve o oposto (GREVE et al., 2014). Feng e Zhang (2015) tiveram conclusão semelhante, mas utilizando apenas dados de umidade do solo entre 1979 e 2013.

2.4 TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO NO BRASIL

No Brasil, estudos que avaliaram tendências em índices de chuva geralmente são discordantes entre si, pois os resultados variam segundo as metodologias, fontes de dados, e períodos de análise (por exemplo, LIEBMANN et al., 2004; HAYLOCK et al., 2006; VARGAS et al., 2011; DOYLE et al., 2012; PINHEIRO et al., 2013; RAO et al., 2016; SALVIANO et al., 2016; SOARES et al., 2017). Apesar disso, analisando apenas os estudos que avaliaram tendências no Brasil para o período aproximado entre 1950 e 2010, nota-se um padrão espacial. As tendências de maior e menor disponibilidade da água estiveram concentradas no litoral e no interior do país respectivamente, considerando mudanças nas chuvas médias, secas, e chuvas extremas (Figura 2). A maior fonte de incerteza desta informação está na região norte do país (Figura 2c), devido à baixa densidade e baixa

disponibilidade de dados de longo prazo (HAYLOCK et al., 2006; ZILLI et al., 2017)

Figura 2. Tendências na chuva média, intensa, e de secas, entre aproximadamente 1950 e 2010. Em azul e vermelho são respectivamente tendências significativas de aumento e redução na quantidade de água. **(a)** Mudanças na severidade (i.e., intensidade e duração) das secas meteorológicas segundo Sheffield et al. (2012) e Spinoni et al. (2014). **(b)** Mudanças na chuva média anual segundo Sun et al. (2012) e Soares et al. (2017). **(c)** Frequência de chuvas intensas segundo Zilli et al. (2017).



O padrão espacial das tendências encontradas entre 1950 e 2010 não foi o mesmo do restante do século XX. As regiões Sul e Sudeste do Brasil tiveram aumentos significativos na chuva média anual no século XX (LIEBMANN et al., 2004; HAYLOCK et al., 2006; BARROS et al., 2008; DOYLE et al., 2012; PINHEIRO et al., 2013). Estes foram um dos maiores aumentos observados no globo (PIAO et al., 2007; SUN et al., 2012). Porém, após a década de 1970 esta tendência se reverteu e passou a haver redução na chuva média anual em determinadas regiões do Sul e Sudeste (RAO et al., 2016). O oposto ocorreu em partes do Cerrado e no Nordeste do Brasil, onde uma tendência de redução na chuva média ao longo do século XX (HAYLOCK et al., 2006; SUN et al., 2012; SOARES et al., 2017), ainda que não significativa, se reverteu na década de 1970 (RAO et al., 2016). Estes acontecimentos citados ocorreram após o salto climático observado na década de 1970. Segundo Carvalho et al. (2011) e Jaques-Coper e Garreaud (2015), este salto climático trouxe mudanças drásticas no regime de temperatura, chuva, sazonalidade, entre outros na América do Sul. Apesar das causas serem incertas, tal fenômeno parece estar relacionado à Oscilação Decenal do

Pacífico, caracterizada por mudanças na temperatura superficial e na circulação das águas do Oceano Pacífico (JACQUES-COPER; GARREAUD, 2015). Isto reforça o fato de que extrapolações das tendências para o futuro têm baixa confiabilidade, pois tendências são dependentes do período considerado e as séries de chuva podem estar inseridas em longos ciclos (MARKONIS; KOUTSOYIANNIS, 2015).

2.5 TENDÊNCIAS DE VAZÃO NO BRASIL

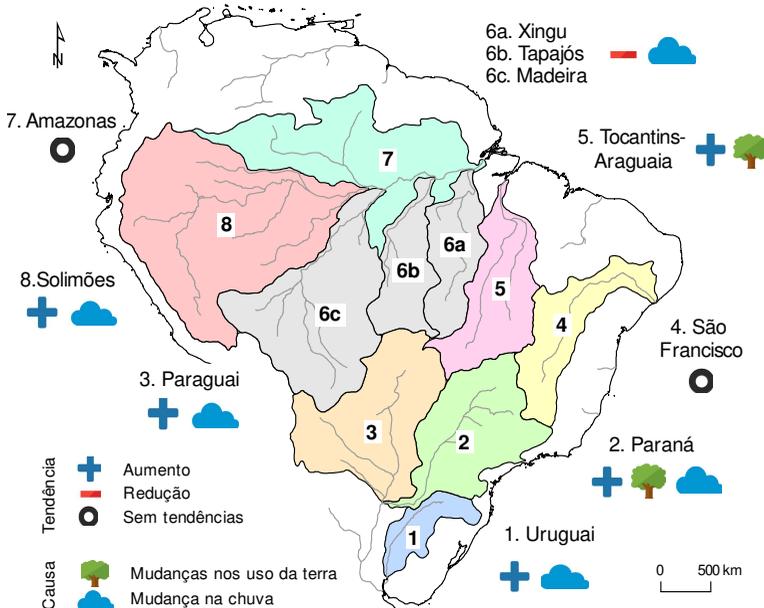
As tendências de vazão das maiores bacias hidrográficas do Brasil foram predominantemente positivas nas décadas recentes, sendo menos controversas que as tendências de chuva. A Figura 3 ilustra quais são as maiores bacias hidrográficas do Brasil, suas tendências de vazão, e as principais causas destas tendências conforme evidências na literatura. O aumento na vazão média anual iniciou-se geralmente próximo da década de 1970, foi frequentemente acompanhado do aumento nas vazões mínimas e máximas anuais, e teve como destaque os rios Uruguai, Paraná, Paraguai, Tocantins-Araguaia, e Solimões (Figura 3).

O rio São Francisco teve pouca mudança na vazão média no balanço de 1930 a 2010 (DETZEL et al., 2011), pois houve redução na vazão antes de 1980 (MARENGO, 1995; GARCIA; MECHOSO, 2005) e aumento após 1980 (GARCIA; MECHOSO, 2005). A bacia do Amazonas também não teve tendência significativa. Porém, desde a década de 1970 o Amazonas teve tendências opostas em suas sub-bacias, sendo positivas nas bacias do oeste (i.e. rio Solimões) e negativas nas bacias do sul (i.e. rios Xingu, Tapajós, e Madeira) (VILLAR et al., 2009). Somado a isto, a partir da década de 1990 houve uma intensificação do ciclo hidrológico na bacia do Amazonas (GLOOR et al., 2013). O aumento na evapotranspiração, aumento na chuva média durante o período úmido, e a redução no período seco estão levando a maiores diferenças entre as vazões máximas e mínimas anuais registradas na bacia (GLOOR et al., 2013).

Das quatro causas de mudanças no regime de vazão (i.e., forçantes hidrológicas), segundo apresentado anteriormente na Figura 1, apenas mudanças na chuva e nos usos da terra foram citadas como predominantes (Figura 3). Apesar das construções de reservatórios serem citadas como causa de mudanças no regime, não há evidências de que foram as maiores fontes de mudanças. Não foram encontrados trabalhos que verificaram os impactos de reservatórios no regime de vazão em escala nacional. Entretanto, segundo Stevaux et al. (2009), a

construção de reservatório na bacia do Paraná modificou principalmente o transporte de sedimentos e a frequência de cheias no ano. Adicionalmente, Zeilhofer e Moura (2009) mostraram que o reservatório na bacia do Paraguai modificou principalmente a sazonalidade da vazão.

Figura 3. Tendências na vazão média anual das maiores bacias hidrográficas do Brasil e as evidências citadas como causas principais. As tendências da vazão diária mínima e máxima anual geralmente acompanharam as tendências da vazão média. O período de análise é a partir da década de 1970. As linhas pretas indicam a América do Sul, as linhas cinza indicam os cursos da água, e os polígonos coloridos indicam a extensão das bacias.



Fontes: 1, para a bacia do Uruguai: Kreppper et al. (2003), Pasquini e Depetris (2007), Saurral et al. (2008), Doyle et al. (2011), Maciel et al. (2013). 2, bacia do Paraná: Berbery e Barros (2002), Pasquini e Depetris (2007), Doyle et al. (2011), Maciel et al., (2013). 3, bacia do Paraguai: Collischonn et al. (2001), Pasquini e Depetris (2007), Maciel et al. (2013). 4, bacia do São Francisco: Marengo (1995), Garcia e Mechoso (2005), Detzel et al. (2011). 5, bacia do Tocantins-Araguaia: Costa et al. (2003), Coe et al. (2011). 6, bacias do Xingú, Tapajós, e Madeira: Villar et al. (2009). 7, bacia do Amazonas: Villar et al. (2009), Gloor et al. (2013); 8, bacia do Solimões, Villar et al. (2009).

As tendências de vazão e de chuva foram coincidentes nas sub-bacias dos rios Amazonas e nas bacias do Paraguai e Uruguai (Figura 3). No caso do Amazonas, as mudanças nas chuvas coincidem com as mudanças de temperatura superficial das águas do Oceano Atlântico tropical (GLOOR et al. 2013). Saurral et al. (2008) usaram o modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC) para analisar a influência da mudança dos usos da terra na vazão média na bacia do Uruguai. As mesmas condições das vazões da década de 1990 foram reproduzidas com as coberturas da terra da década de 1960, descartando mudanças na cobertura da terra como causa principal das mudanças na vazão (SAURRAL et al., 2008).

Alterações nas coberturas da terra foram citadas como causas principais das mudanças na vazão das bacias do Paraná e do Tocantins-Araguaia (DOYLE et al., 2011; MACIEL et al., (2013); COSTA et al. 2003). As causas na bacia do Paraná são atribuídas à cobertura da terra porque o aumento na vazão média foi substancialmente maior que o aumento observado nas chuvas. Inclusive, a bacia do Rio da Prata (i.e. rios Paraná, Uruguai, e Paraguai) esteve entre as maiores tendências na vazão média observada no globo no século XX (PIAO et al., 2007). A bacia do Paraná foi a que passou pela maior quantidade de alterações das coberturas da terra desde 1940 no país (DIAS et al., 2016). No caso da bacia do Tocantins-Araguaia, houve um aumento de 24% na vazão média anual entre 1960 e 1998, apesar da chuva média não ter aumentado no período (COSTA et al., 2003). A ocupação de pastagens nesta bacia passou de 30% em 1960 para 49% em 1998 e foi originária do desflorestamento. Portanto, apesar da infiltração ter sido reduzida, a maior causa de mudança foi a redução da evapotranspiração com a remoção da vegetação nativa (COSTA et al., 2003).

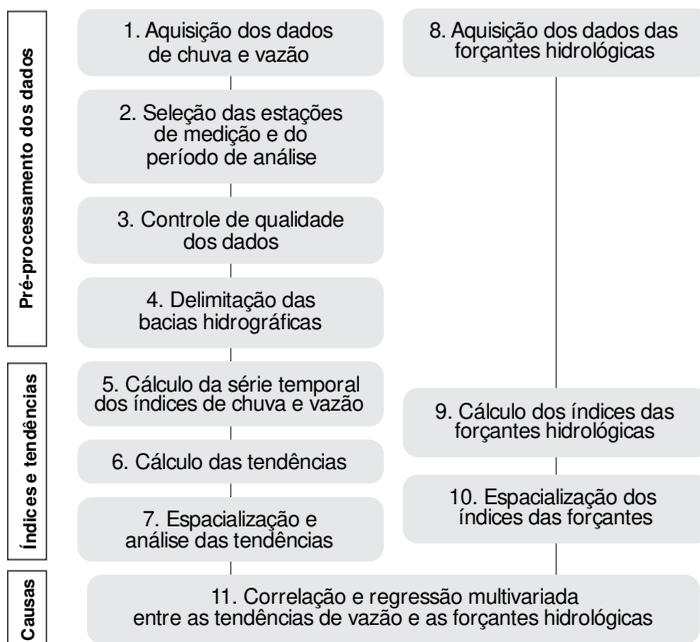
A remoção de florestas tropicais densas para a implementação de agricultura pode levar a profundas modificações dos processos hidrológicos, embora seus impactos sejam controversos e difíceis de analisar (BRUIJNZEEL et al., 2005). Por exemplo, as taxas de interceptação em plantios de cana-de-açúcar dependem dos estádios de crescimento do plantio e são substancialmente diferentes das observadas em florestas tropicais nativas (SILVA et al., 2016; FERNANDES et al., 2017). O desflorestamento para a implantação da agricultura pode reduzir as taxas de evapotranspiração, podendo ter impactos como o aumento na vazão média (BRUIJNZEEL, 2004), na recarga dos aquíferos, no fluxo de base, e nas vazões baixas (ANDRÉASSIAN, 2004). Porém, se o desflorestamento estiver associado à alta degradação do solo, seus impactos podem ser os opostos: redução da capacidade de

infiltração (BRUIJNZEEL et al., 2005); redução da recarga dos aquíferos e de vazões baixas (RODRIGUEZ et al., 2010); aumento do escoamento superficial e de vazões altas (SALEMI et al., 2013); e uma resposta mais rápida da vazão aos eventos de chuva (RAMÍREZ et al., 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho segue a esquematização da Figura 4. O trabalho é dividido em três etapas gerais: (i) pré-processamento dos dados (passos 1-4 e 8); (ii) cálculo de índices e tendências (passos 5-7 e 9-10); e (iii) busca pelas causas das tendências de vazão (passo 11). Inicialmente, os dados de vazão e chuva de quase 20 mil estações de medição do Brasil foram adquiridos e selecionados para uso. Estes dados passaram por um controle de qualidade e foram espacializados a partir da delimitação de suas respectivas bacias hidrográficas. Para cada estação de medição foram calculados onze índices de chuva e vazão. Cada índice teve suas tendências quantificadas e espacializadas em mapas. Posteriormente, foram calculados índices das forçantes hidrológicas das mudanças de vazão. Na última etapa, a busca pelas causas das mudanças de vazão foi feita com correlações, regressões multivariadas entre as tendências de vazão e as forçantes hidrológicas, e classificação de bacias.

Figura 4. Fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho.

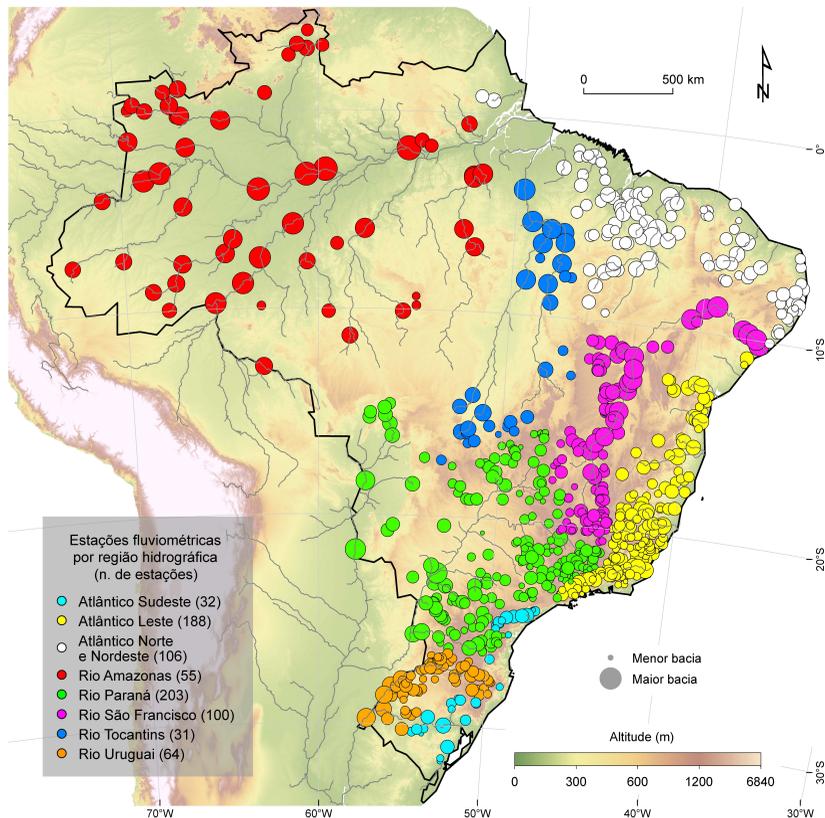


3.1 ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho analisa as bacias hidrográficas dos rios que escoam ao longo do Brasil e têm seus exutórios dentro do país. A Agência Nacional de Águas (ANA), responsável por disponibilizar dados de vazão e de chuva no país, possui dados de mais de mais de 8100 estações fluviométricas e 11700 estações pluviométricas (ANA, 2018). Deste total, apenas 779 estações de medição de vazão e 2323 de chuva foram usadas para identificar as tendências no regime de vazão e de chuva, entre 1980 e 2015. Os critérios de seleção das estações e do período está descrito em maiores detalhes adiante no texto (seções 3.2 e 3.3). Os dados de chuva são medições diárias a partir de pluviógrafos (ANA, 2018). Os dados de vazão são a média de duas medições de cota por dia, uma no início da manhã e outra no final da tarde, na qual a vazão é estimada a partir de uma relação cota-vazão (i.e., curva-chave; ANA, 2018).

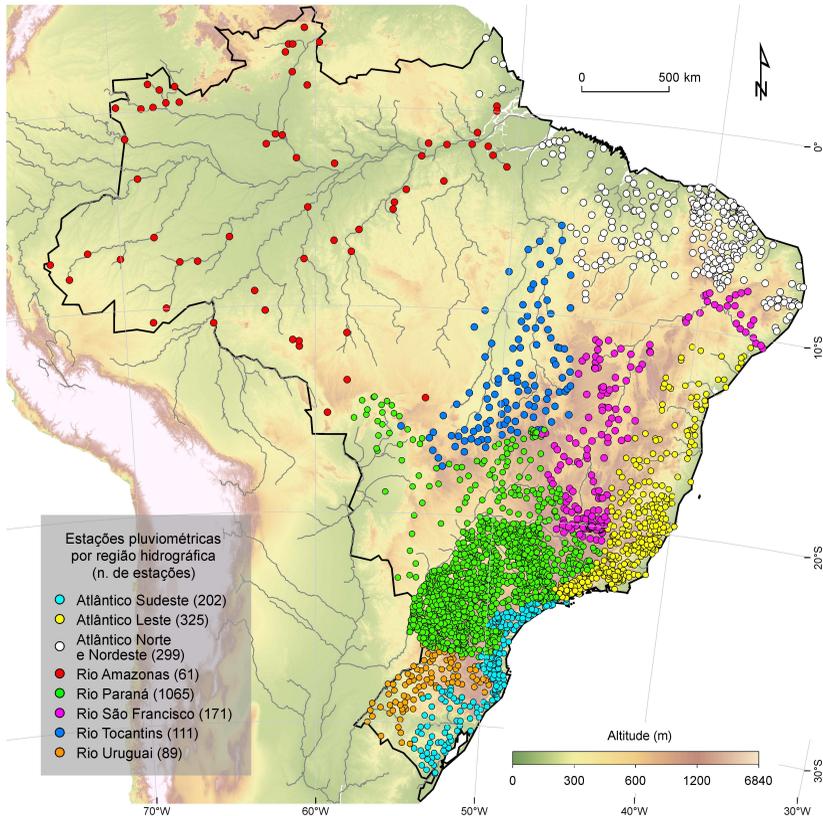
As Figuras 5 e 6 mostram as estações de medição de vazão e de chuva usadas neste estudo, classificadas segundo as regiões hidrográficas definidas por ANA (2018). As maiores bacias do Brasil são, respectivamente, do Amazonas, Tocantins, Paraná, São Francisco, Paraguai, e Uruguai. Grande parte das bacias (i.e., 41% do total) possuem entre mil e dez mil km². 29% das bacias são menores que mil km² e 30% maiores que dez mil km². A bacia do Paraná possui a maior parte das estações de medição de chuva (45,8% do total) e do Amazonas a menor parte (2,6% do total).

Figura 5. Localização das 779 estações de medição de vazão usadas neste estudo, classificadas segundo as regiões hidrográficas definidas por ANA (2018). As linhas pretas indicam o limite territorial do Brasil e as linhas cinza os cursos da água. O tamanho do círculo das estações de medição é proporcional à área da bacia hidrográfica.



Fontes: altimetria e cursos da água (USGS, 2006), estações fluviométricas (ANA, 2018), limite territorial do Brasil (IBGE, 2015).

Figura 6. Localização das 2323 estações de medição de chuva usadas neste estudo, classificadas segundo as regiões hidrográficas definidas por ANA (2018). As linhas pretas indicam o limite territorial do Brasil e as linhas cinza os cursos da água.

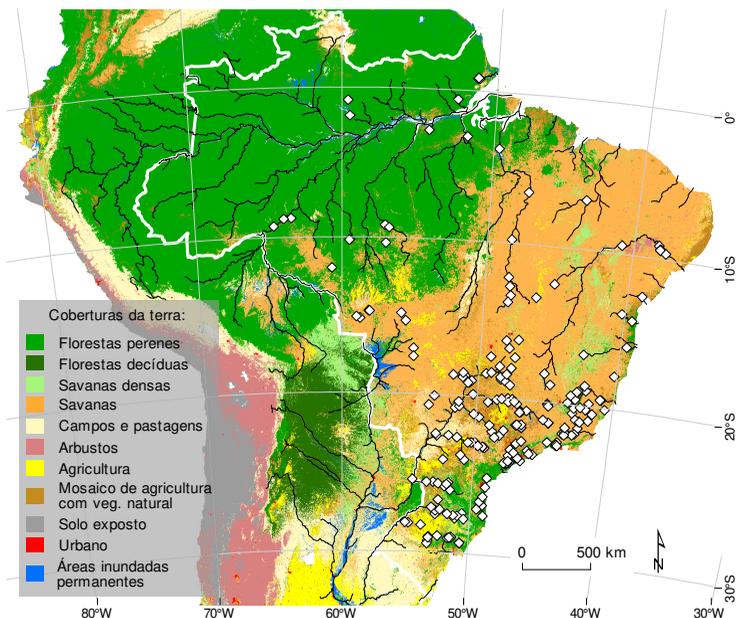


Fontes: altimetria e cursos da água (USGS, 2006), estações fluviométricas (ANA, 2018), limite territorial do Brasil (IBGE, 2015).

A Figura 7 mostra as coberturas da terra do Brasil mais comuns de 2000 a 2010 a partir da classificação de baixa incerteza de Broxton et al. (2014). As coberturas mais frequentes são as florestas, savanas, pastagens, e agricultura. As regiões hidrográficas com maior presença de Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) são o Uruguai, Paraná, Atlântico Sul e Leste (Figura 7). A agricultura irrigada, maior fonte de uso consuntivo da água no Brasil (REBOLSAS, 2015), está presente principalmente no centro-sul do Rio Grande do Sul, no oeste da Bahia, e

no interior de São Paulo e Goiás (ANA, 2018). Portanto, as bacias do Uruguai, Paraná, e São Francisco são as mais afetadas por esta prática. A exploração da água subterrânea tem destaque no Nordeste do país, no interior de São Paulo e do Sul do Brasil (CPRM, 2014).

Figura 7. Usos da terra mais frequentes entre os anos 2000 e 2010, segundo Broxton et al. (2014). Os losangos brancos indicam as Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) segundo ANEEL (2018).

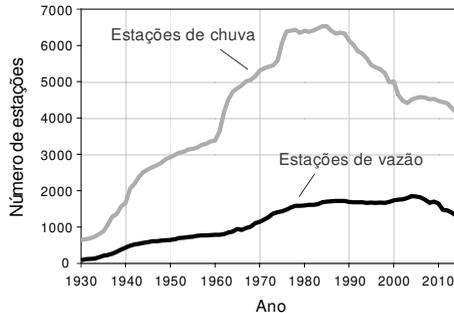


3.2 SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO E DO PERÍODO DE ANÁLISE

Conforme citado anteriormente, foram analisadas tendências entre 1980 e 2015. A escolha deste período se deu por dois fatores. Primeiro, a década de 1970 passou por um salto climático e grandes mudanças no regime de chuvas e vazão (CARVALHO et al., 2011; JQUES-COPER; GARREAUD, 2015). Portanto, analisar as tendências após a década de 1970 permite capturar um período de chuvas e vazão mais estável e com menos valores extremos na série. Segundo, este período possui uma grande quantidade de estações de medição disponíveis para análise (Figura 8). Houve um aumento no número de estações pluviométricas na segunda metade da década de

1970 (Figura 8). Além disso, grande parte das medições de chuva e de vazão no Norte e no Centro-oeste do Brasil iniciaram-se apenas no final da década de 1970 (não mostrado).

Figura 8. Disponibilidade de estações de medição no Brasil, segundo dados da ANA (2018).



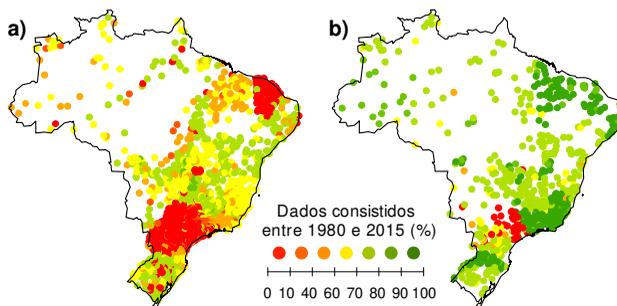
Uma vez escolhido o período de análise, foi feita a seleção de quais estações de medição utilizar a partir das quase 20 mil disponíveis. Esta seleção se deu com base na quantidade de falhas na série temporal, i.e., de ausência de observações. Considerando que as tendências calculadas são na escala anual (seção 3.6), foram consideradas apenas estações com pelo menos 25 anos de dados sem qualquer falha na série. Foi exigido no mínimo de 25 anos de dados pois os testes estatísticos usados (seção 3.6) devem conter no mínimo 20 amostras (HENSEL; HIRSCH, 2002). Os anos com qualquer falha na série tiveram seus dados descartados, pois falhas diárias são de difícil preenchimento e aumentam a incerteza da série (PAPPAS et al., 2014). Apenas uma estação de medição de vazão que não cumpre este conjunto de critérios foi adicionada na análise: a do rio Tapajós (código 1750000), com apenas 18 anos de dados completos entre 1980 e 2015. Como o Tapajós ocupa uma parte substancial do Brasil (i.e., 370 mil km²), esta exceção foi permitida para completar a análise de praticamente todo o território do país.

3.3 CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS

Antes de qualquer análise estatística é necessário verificar a qualidade dos dados utilizados. Segundo Kundzewicz e Robson (2004), problemas em dados hidrológicos são frequentes. Estes incluem erros tipográficos, mau funcionamento dos instrumentos de medição,

mudanças nos equipamentos de medição (e.g. sua localização), e mudanças na estimativa de vazão (i.e., na curva-chave). A ANA consiste os dados de chuva e de vazão no Brasil, verificando a qualidade e corrigindo eventuais erros. Porém, esta consistência não ocorre em todas as estações e nem em toda a série de dados. A Figura 9 mostra a consistência feita pela ANA dos dados de chuva e de vazão usadas neste estudo, de 1980 a 2015. Os dados de vazão têm maior consistência que os dados de chuva. Além disso, alguns estados, como o Paraná, São Paulo, e Ceará, praticamente não possuem dados de chuva consistidos (Figura 9a). Portanto, antes de calcular os índices e tendências, as séries tiveram suas qualidades verificadas em maiores detalhes.

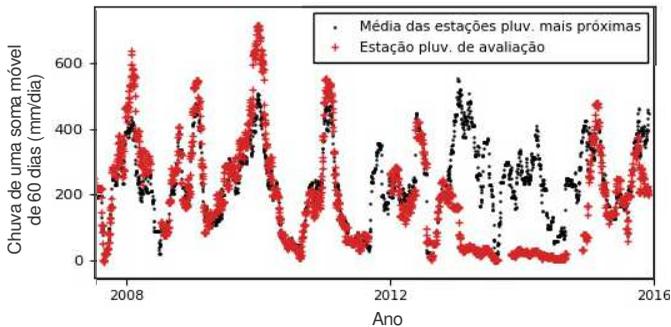
Figura 9. Porcentagem consistida dos dados entre 1980 e 2015 de (a) chuva e (b) vazão, segundo dados da ANA (2018).



Dois procedimentos são os mais recomendados para verificar a qualidade de dados de chuva e vazão. Primeiro, Peterson et al. (1998) sugere verificar os metadados, onde a agência reguladora informa sobre quaisquer mudanças ocorridas nos instrumentos de medição. Este procedimento não foi adotado neste trabalho, porque a ANA não disponibiliza estas informações para todas as estações de medição. O segundo procedimento, conforme Wijngaard et al. (2003), é usar testes estatísticos que identifiquem mudanças abruptas na série temporal. Caso seja identificada alguma mudança, deverão ser buscadas causas que expliquem o ocorrido, como mudanças nos equipamentos de medição ou construção de obras hidráulicas. Este procedimento também não foi adotado neste trabalho e dificilmente é adotado em estudos no Brasil com grande quantidade de dados (XAVIER et al., 2016). O motivo deve-se à quantidade de estações que torna impraticável a busca pelas causas de cada mudança individualmente.

O controle de qualidade dos dados de chuva neste trabalho foi a mesma utilizada por Xavier et al. (2016). Xavier et al. (2016) verificaram a qualidade de dados climáticos comparando visualmente cada estação de medição com as estações vizinhas. Uma vez que determinada parte da série esteja em desacordo com as medições vizinhas, a série é descartada. Este procedimento é exemplificado na Figura 10, em que um trecho de uma série de chuva foi considerado inconsistente com as medições vizinhas e seus dados foram descartados. Todas as estações pluviométricas selecionadas anteriormente pela disponibilidade de dados (seção 3.2) tiveram suas séries comparadas com a média das três estações vizinhas mais próximas. Para isso foram usadas médias móveis de 7, 15, e 60 dias. Um total de 2323 estações pluviométricas usadas neste trabalho foram aprovadas pelo controle de qualidade. Outras 63 estações previamente selecionadas pela disponibilidade de dados não cumpriram o critério de qualidade e foram descartadas. Os motivos do descarte destas estações estão no Apêndice A. Os gráficos usados no controle de qualidade, a série diária, e a localização das 2323 estações aprovadas estão no Anexo A. O mesmo para as 63 estações descartadas estão no Anexo B.

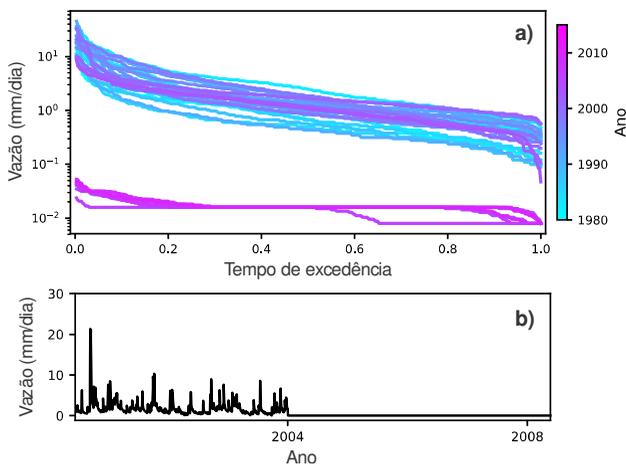
Figura 10. Exemplo do controle de qualidade de dados de chuva a partir de medições vizinhas. A série é da estação pluviométrica 2349005, localizada no estado de São Paulo. A série é identificada como inconsistente após 2012 e foi descartada.



No caso dos dados de vazão, o controle de qualidade é dificultado porque não há necessariamente alta correlação entre estações de medição vizinhas. Este trabalho adotou a recomendação proposta por Cole et al. (2003), baseada na visualização da curva de permanência da vazão com a série temporal. A curva de permanência ordena a vazão diária em magnitudes decrescentes e indica o percentil do tempo em que

esta é igualada ou excedida (VOGEL; FENNESSEY, 1994). Visualizando as curvas de permanência de cada ano em um gráfico é possível identificar com facilidade anos com erros tipográficos. Isto é ilustrado na Figura 11, em que quatro curvas de permanência anuais estão com ordens de grandeza menor que as demais. Porém, erros nos dados podem ocorrer não no ano inteiro, mas em apenas alguns dias do ano. Quando isto ocorre, a curva de permanência tende a ser alterada apenas nos dois extremos, tornando os erros de difícil identificação (COLE et al., 2003). Estes tipos de erros pontuais não foram verificados em maiores detalhes neste trabalho. Das estações fluviométricas selecionadas previamente pela disponibilidade dos dados, 779 foram aprovadas pelo controle de qualidade e 23 foram descartadas. Os motivos dos descartes estão no Apêndice B. Os gráficos usados no controle de qualidade, a série diária, e a localidade das estações aprovadas estão no Anexo C; e das descartadas no Anexo D.

Figura 11. Exemplo do controle de qualidade dos dados de vazão a partir de (a) curvas de permanência anuais e (b) sua respectiva série temporal diária. Quatro curvas de permanência anuais possuem vazões com ordens de grandeza abaixo das demais curvas, representando algum erro na série de dados. A série temporal mostra que estes erros iniciaram em 2004. A estação fluviométrica usada tem código 64620000, localizada na cidade de Prudentópolis, no Paraná.



3.4 DELIMITAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

O quarto passo deste trabalho (Figura 4) foi a delimitação das bacias hidrográficas. A extensão espacial das bacias hidrográficas é necessária pra calcular os índices de vazão, de chuva, e das forçantes hidrológicas das mudanças na vazão. Os dados de vazão fornecidos pela ANA têm unidade de medida em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Porém, para poder comparar entre diferentes bacias hidrográficas é recomendado normalizar esta unidade de medida pela área da bacia (MCMILLAN et al., 2017). A saída desta normalização é a vazão representada em mm por dia, permitindo comparação direta com outras variáveis que possuem a mesma unidade de medida (e.g., chuva, evapotranspiração).

Para delimitar as bacias foram usados dados do modelo digital de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*, USGS, 2006). Tratam-se de dados altimétricos de 90 metros de resolução horizontal e um metro de equidistância vertical. A delimitação foi feita com o software ArcGIS em conjunto com códigos em *Python*. Para confirmar se a delimitação foi feita corretamente, foram adotadas três medidas: (i) a interpretação de imagens de sensoriamento remoto em conjunto com a altitude, disponibilizadas pelo software *Google Earth*; (ii) a comparação entre as áreas das bacias delimitadas com as áreas fornecida pela ANA, em que notou-se quase igualdade (não mostrado); e (iii) a comparação entre a vazão média anual de cada bacia com a chuva média anual, onde a vazão anual sempre deve ser menor que a chuva anual. Algumas bacias foram descartadas pela última medida e estão listadas em conjunto com os descartes do controle de qualidade da vazão (Apêndice B). A extensão das bacias hidrográficas delimitadas de todas as estações fluviométricas está disponível no Anexo E.

3.5 ÍNDICES DE CHUVA E VAZÃO

Após as etapas de pré-processamento dos dados de chuva e vazão, foram calculados índices dos regimes de chuva e vazão. Para cada estação de medição foi gerado uma série temporal, na escala anual, para cada índice calculado. A partir destas séries foram calculadas suas tendências. Não há concordância na literatura sobre quais índices escolher para avaliar o comportamento da vazão, tampouco um conjunto completo de índices recomendados (MCMILLAN et al., 2017). Os índices de vazão foram escolhidos conforme as categorias do regime de vazão citado anteriormente, propostos por Richter et al. (1996) e Poff et al. (1997). Estas categorias do regime de vazão foram aplicadas também

às chuvas. Para cada índice de vazão foi buscado um índice semelhante de chuva, ainda que não há necessariamente uma relação de causa e efeito entre ambos os índices. A escolha dos índices se deu a partir dos mais comumente encontrados na literatura, a fim de permitir comparações com outros trabalhos. Os índices de vazão estão na Tabela 2, de chuva na Tabela 3, e serão descritos nas próximas seções.

Os índices foram calculados na escala anual, em oposto à mensal, a fim de eliminar o efeito da sazonalidade e aumentar a independência dos dados na série temporal. Com isso, foi permitido realizar o cálculo das tendências. Adicionalmente, também para aumentar a independência dos dados na série temporal, recomenda-se calcular os índices de condições médias e altas com o ano hidrológico iniciando no mês seguinte ao mais seco do ano (KUNDZEWICZ; ROBSON, 2004). Para os índices de condições baixas, recomenda-se o ano hidrológico iniciando no mês seguinte ao mais úmido do ano (SMAKHTIN, 2001). A maior parte das bacias analisadas possuem o mês mais úmido (i.e., maior vazão média) em fevereiro e o mais seco (i.e., menor vazão média) em agosto (não mostrado). Portanto, os índices das condições médias e altas de vazão foram calculados para o ano hidrológico de setembro a agosto; e das condições baixas de março a fevereiro.

3.5.1 Frequência e duração das cheias e das secas

Os índices que representam a categoria frequência do regime contabilizam a quantidade por ano de eventos (i.e., de ocorrências) de vazão ou chuva acima ou abaixo de determinado limiar. Eventos acima do limiar do percentil 90 de longo prazo foram considerados cheias (no caso da vazão) ou chuvas intensas. Por outro lado, eventos com vazão abaixo do limiar do percentil 10 de longo prazo foram considerados eventos de seca hidrológica. No caso da chuva, ao invés de usar o percentil 10 foi usado um limiar fixo de 1 mm, uma vez que este método é mais comumente usado (e.g. HAYLOCK et al., 2006). Portanto, foram identificados apenas eventos com ausência de chuva, e não necessariamente secas meteorológicas. A duração dos eventos corresponde ao tempo em que a vazão ou chuva permaneceu acima ou abaixo destes limiares.

Tabela 2. Índices usados para avaliar as mudanças no regime de vazão, de acordo com as onze subcategorias do regime.

Condição da vazão	Categoria do regime	Nome	Descrição (unidade)	Ano hid.
Média	Magnitude	Vazão média anual	Vazão média anual (mm ano ⁻¹)	Set-Ago
	Taxa de variação	Autocorrelação da vazão diária	Autocorrelação (passo de tempo igual a 1) das vazões diárias (-)	Set-Ago
	Sazonalidade	Sazonalidade da vazão média	Índice de Sazonalidade de Markham das vazões mensais (-)	Set-Ago
	Sazonalidade	Centroide da vazão diária	Centro de massa do tempo das vazões diárias no ano (dia)	Set-Ago
Alta	Magnitude	Vazão máxima anual	Vazão diária máxima anual (mm)	Set-Ago
	Frequência	Frequência anual de cheias	Nº de eventos no ano com vazão acima do percentil 90 de longo prazo (eventos ano ⁻¹)	Set-Ago
	Duração	Cheia de maior duração no ano	Duração do evento mais longo com vazão acima do percentil 90 de longo prazo (dias)	Set-Ago
	Sazonalidade	Dia da vazão máxima	Dia gregoriano da vazão diária máxima anual (dia)	Set-Ago
Baixa	Magnitude	Vazão mínima anual	Vazão diária mínima anual da média móvel de 7 dias (mm)	Mar-Fev
	Frequência	Frequência anual de secas hidrológicas	Nº de eventos no ano com vazão (da média móvel de 7 dias) abaixo do percentil 10 de longo prazo (eventos ano ⁻¹)	Mar-Fev
	Duração	Duração média anual das secas hidrológicas	Duração média dos eventos no ano com vazão (da média móvel de 7 dias) abaixo do percentil 10 de longo prazo (dias evento ⁻¹)	Mar-Fev
	Sazonalidade	Dia da vazão mínima	Dia gregoriano da vazão (média móvel de 7 dias) diária mínima anual (dia)	Mar-Fev

Tabela 3. Índices usados para avaliar as mudanças no regime de chuva, de acordo com as onze subcategorias do regime.

Condição da chuva	Categoria do regime	Nome	Descrição (unidade)	Ano hid.
Médias	Magnitude	Chuva média anual	Chuva média anual (mm ano ⁻¹)	Set-Ago
	Taxa de variação	Desvio padrão anual da chuva	Desvio padrão anual das chuvas diárias maiores que 1 mm (mm)	Set-Ago
	Sazonalidade	Sazonalidade da chuva média	Índice de Sazonalidade de Markham das chuvas mensais (-)	Set-Ago
	Sazonalidade	Centroide da chuva diária	Centro de massa do tempo das chuvas diárias no ano (dia)	Set-Ago
Altas	Magnitude	Chuva máxima anual	Chuva diária máxima anual (mm)	Set-Ago
	Frequência	Frequência anual de chuvas intensas	Nº de eventos no ano com chuva acima do percentil 90 de longo prazo (eventos ano ⁻¹)	Set-Ago
	Duração	Chuva intensa de maior duração no ano	Duração do evento mais longo com chuva acima do percentil 90 de longo prazo (dias)	Set-Ago
	Sazonalidade	Dia da chuva máxima	Dia gregoriano da chuva diária máxima anual de uma média móvel de 5 dias (dia)	Set-Ago
Baixas	Magnitude	Chuva entre os percentis 0 e 20	Chuva média entre os percentis 0 e 20 no ano. Apenas chuvas diárias acima de 1 mm são consideradas (mm)	Mar-Fev
	Frequência	Frequência anual de eventos sem chuva	Nº de eventos no ano com dias consecutivos de chuva abaixo de 1 mm (eventos ano ⁻¹)	Mar-Fev
	Duração	Duração média anual dos eventos sem chuva	Duração média dos eventos no ano com chuva abaixo de 1 mm (dias evento ⁻¹)	Mar-Fev
	Sazonalidade	Dia de início do evento sem chuva mais longo	Dia gregoriano do início do evento anual mais longo com chuva diária abaixo de 5 mm (a partir de uma média móvel de 5 dias) (dia)	Mar-Fev

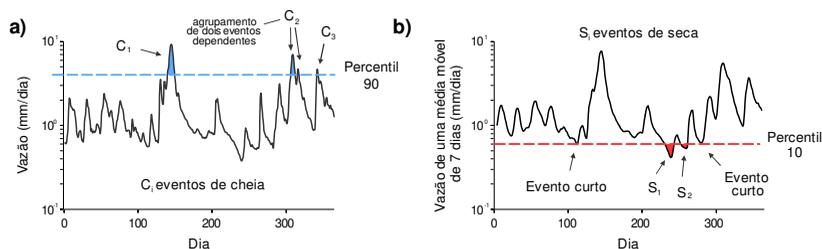
O cálculo dos percentis de longo prazo se deu em dois passos. Primeiro, o percentil (90 ou 10) foi calculado para cada estação de medição e para cada ano. No caso da chuva, apenas os dias com chuva maior que 1 mm foram considerados no cálculo do percentil 90. O motivo disto está em minimizar chuvas não detectadas, pois nem toda estação de medição identifica chuvas abaixo de 1 mm (HAYLOCK; NICHOLLS, 2000). Uma vez calculados os percentis (90 ou 10) de cada ano, o segundo passo foi selecionar a mediana destes valores como o limiar. Apesar de diversos trabalhos usarem percentis maiores (e.g., 95 e 99) para definir eventos intensos de chuva (e.g. HAYLOCK; NICHOLLS, 2000; KRISHNAMURTHY et al., 2009; VILLARINI et al., 2013) e vazão (e.g. MATONSE; FREI, 2013), neste trabalho foi usado o percentil 90 para se ter um maior número de amostras anuais de eventos intensos.

A identificação das cheias é exemplificada na Figura 12a. É notada a ocorrência de duas cheias muito próximas, que não são considerados eventos independentes e, portanto, foram agrupadas no evento C_2 (Figura 12a). Não há um padrão rígido universal para o agrupamento de eventos dependentes de cheias. Mallakpour e Villarini (2016) e Petrow e Merz (2009) definiram que eventos independentes ocorrem com intervalos de dias entre si, geralmente variando de 5 a 30 dias. Svensson et al. (2005) usaram critério semelhante, porém com o intervalo de dias variando segundo a área da bacia. Archfield et al. (2016) usaram um critério em função da variabilidade da vazão. Por ser mais comumente usado e mais simples, neste trabalho foram consideradas independentes as cheias que ocorreram com pelo menos 5 dias de espaçamento entre si.

O caso da frequência e duração de eventos de seca é um pouco mais complexo que o de cheias. Uma seca pode ser definida como um evento em que a demanda de água pela sociedade ou pelo ecossistema é maior que sua disponibilidade (Van Loon, 2015). Se assumir uma demanda constante (e.g., percentil 10 de longo prazo), vazões abaixo desta demanda são caracterizadas como seca. Um problema, entretanto, é que a escala de tempo mais apropriada para investigar secas é a mensal (MISHRA; SINGH, 2010). A maior parte dos índices de seca são na escala mensal, como o SPI, SPEI, e PDSI (ZARGAR et al., 2011). Ao analisar secas na escala diária tem-se a vantagem de maior precisão em identificar o período de início e fim da seca (BYUN; WILHITE, 1999). Porém, também existem algumas desvantagens: (i) uma maior ocorrência de eventos dependentes; e (ii) a presença de eventos muito curtos para serem interpretadas como secas, apesar de ultrapassarem o

limiar definido. A primeira desvantagem pode ser resolvida com o agrupamento dos eventos dependentes a partir de duas técnicas principais: a exigência de um intervalo de tempo entre os eventos, semelhante ao aplicado para as cheias, que não foi usado neste trabalho porque é problemático para bacias pequenas e com respostas rápidas (FLEIG et al., 2006); ou a aplicação de médias móveis sobre a série, o qual é menos problemático que o anterior (FLEIG et al., 2006). Neste trabalho, os eventos dependentes de seca foram agrupados com a aplicação de uma média móvel de 7 dias na série diária de vazão, segundo recomendado por Fleig et al. (2006). A segunda desvantagem do uso de dados diários (i.e., a presença de eventos curtos) pode ser resolvida eliminando eventos com menos de 3 dias de duração, segundo adotado por Van Loon e Laaha (2015) e também neste trabalho. Estes critérios são exemplificados na Figura 12b, onde dois eventos curtos são descartados, e onde a média móvel de 7 dias na série de vazão define os eventos S_1 e S_2 como independentes.

Figura 12. (a) Exemplo da identificação de eventos de cheia (i.e., eventos com vazão diária acima do percentil 90). São identificadas três cheias, sendo uma delas do agrupamento de dois eventos dependentes. (b) Identificação de eventos de seca hidrológica (i.e., com vazão abaixo do percentil 10, a partir da média móvel de 7 dias). Dois eventos são considerados curtos e não contabilizados no número de secas. A série de vazão é de 2007, do rio Negro, afluente do rio Iguaçu no norte de SC.



3.5.2 Sazonalidade

A sazonalidade é uma categoria do regime que se aplica às vazões ou chuvas de condições médias, altas, e baixas. Quando se fala em sazonalidade de cheias, de chuva intensas, ou de secas, entende-se como o período no ano em que tais eventos geralmente ocorrem (e.g., VILLARINI, 2016; BLÖSCHL et al., 2017). Portanto, os índices usados neste trabalho correspondem ao dia do ano em que o evento mais

extremo ocorreu (Tabelas 2 e 3). A única exceção está na sazonalidade das chuvas de condições baixas, uma vez que o caso mais extremo sempre será chuva igual a zero. Neste caso, foi adotado um índice que avalia o evento de maior duração. Foi adotado o maior evento de uma média móvel de 5 dias da chuva diária com chuvas abaixo de 5 mm por dia. Critério semelhante foi usado por Marengo et al. (2001) e Costa e Pires (2010). Foi definido o valor de 5 mm por dia porque acima deste valor a chuva sempre ultrapassa a evapotranspiração da maior parte do país (e.g., ZHANG et al., 2016), permitindo um balanço hídrico positivo.

Quando se fala da sazonalidade de condições médias de vazão ou de chuva, entende-se como duas características: a variabilidade mensal ao longo do ano; e o período do ano com a maior concentração de vazão ou de chuva (e.g. MARKHAM, 1980; FENG et al., 2013). Portanto, um índice relacionado a cada característica foi considerado (Tabelas 2 e 3). A variabilidade mensal da chuva e vazão foi avaliada com o Índice de Sazonalidade de Markham – MSI (MARKHAM, 1980). Embora originalmente proposto para a precipitação, também pode ser usado para a vazão (e.g., BARCO et al., 2013; PETERSEN et al., 2012). O índice varia de zero a um, sendo zero o valor da menor sazonalidade (i.e., quando a média anual está igualmente dividida nos meses ou quando a sazonalidade não é unimodal) e um o valor da maior sazonalidade (i.e., quando está todo concentrado em apenas um mês). Este índice é uma estatística circular, tendo início no primeiro dia do ano hidrológico (i.e., 1º de setembro) e sentido horário. A variável (neste caso, chuva ou vazão mensal) é representada por vetores, com magnitude igual ao total mensal e direção igual ao ângulo em função do mês. No caso da chuva, o índice é calculado com o vetor resultante:

$$R = (R_Y^2 + R_X^2)^{1/2} \quad (1)$$

onde R_Y e R_X são as somas das projeções de dois eixos ortogonais:

$$R_Y = \sum_{m=1}^{12} P_m \sin(\theta_m) \quad (2)$$

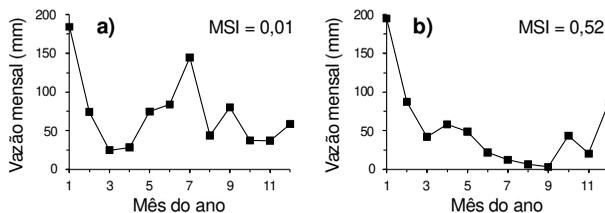
$$R_X = \sum_{m=1}^{12} P_m \cos(\theta_m) \quad (3)$$

onde m é o mês; P_m é a chuva total do respectivo mês; ϕ_m é o ângulo calculado a partir do dia médio do mês, considerando que o ano completo possui um total de 360 graus. Com isso, o Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) para a chuva é:

$$MSI_P = \frac{R}{\sum_{m=1}^{12} P_m} \quad (4)$$

Segundo Markham (1980), com um valor de MSI acima de 0,2 já é notado clara sazonalidade na série. Este índice é exemplificado na Figura 13, onde duas séries de vazão de 2010 (rio Guaporé e rio Corumbataí) têm seus MSI calculados. O primeiro (Figura 13a) tem MSI quase igual a zero (i.e., com sazonalidade bimodal) e o segundo (Figura 13b) tem MSI elevado (i.e., sazonalidade alta e unimodal) com maiores vazões durante o verão.

Figura 13. Exemplo do Índice de Sazonalidade de Markham (MSI) da vazão (a) do rio Guaporé e (b) do rio Corumbataí. As vazões são de 2010.



Além da variabilidade mensal, outra característica da sazonalidade de condições médias o período do ano com a maior concentração de vazão ou de chuva. Para isto será adotado o centro de massa do tempo da série de vazão e de chuva, conforme usado também em outros trabalhos (STEWART et al., 2004; FENG et al., 2013; STEWART, 2013). O centro de massa do tempo da vazão é calculado com:

$$CT_Q = \frac{\sum t_i q_i}{\sum q_i} \quad (5)$$

onde t_i é o tempo em dias, iniciando no dia 1 de setembro; e q_i é a vazão correspondente ao dia i . A mesma ideia prossegue para a chuva. Uma tendência negativa neste índice indicaria que a chuva ou vazão está se

concentrando cada vez mais no começo do ano hidrológico de Set-Ago, e uma tendência positiva indicaria o oposto.

3.5.3 Taxa de variação

A última categoria do regime é a taxa de variação, que busca indicar o quão rapidamente a vazão passa de uma magnitude para outra (POFF et al., 1997). Diversos índices que avaliam a taxa de variação e a dinâmica da vazão são encontrados na literatura: coeficiente de variação da vazão diária; número de reversões na série (i.e., número vezes que a vazão passa de ascendente para descendente ou o oposto; CLAUSEN; BIGGS, 2000); declividade da curva de permanência entre os percentis 33 e 66 (YADAV et al., 2007); índice de concavidade da curva de permanência (SAUQUET; CATALOGNE, 2011); *Richard-Baker Flashiness Index* (BAKER et al., 2004); entre outros. Alguns destes índices foram demonstrados como pouco efetivos, como o número de reversões na série (OLDEN; POFF, 2003). O coeficiente de variação e a declividade da curva de permanência, calculada entre 33 e 66%, são fortemente afetados pela sazonalidade da vazão (YOKOO; SIVAPALAN, 2011) e possuem alta incerteza, comumente maior que a variabilidade observada entre as bacias (WESTERBERG et al., 2016). Alternativamente, neste trabalho foi adotada a autocorrelação de passo igual a um dia, uma vez que este índice não foi identificado como tendo as desvantagens citadas. A autocorrelação é a correlação entre a série da vazão diária e a mesma série deslocada em um passo de tempo (i.e., um dia). Se trata de um índice que indica a suavidade da série da vazão (e.g. TOTH, 2013; EUSER et al., 2013).

3.6 CÁLCULO DAS TENDÊNCIAS

Após a seleção das estações de análise, o controle de qualidade dos dados, e o cálculo dos índices na escala anual, foram calculadas as tendências nos índices, entre 1980 e 2015. Quando é identificada uma tendência substancial e significativa, entende-se como uma evidência de que tal categoria do regime passou por mudanças durante o período em questão.

Tendências na série temporal podem ser graduais, abruptas, ou de alguma outra forma mais complexa (e.g., na variância). Para cada um destes tipos existem diferentes testes estatísticos. Hensel e Hirsch (2002) afirmam que tendências abruptas devem ser avaliadas caso se queira investigar um motivo particular para tal acontecimento, como a

construção de alguma obra hidráulica. Além disso, Hensel e Hirsch (2002) afirmam que para fazer uma comparação regional (i.e., entre várias estações) as mudanças abruptas devem ter ocorrido em períodos semelhantes. Como este trabalho busca explorar padrões espaciais das tendências e não analisar um acontecimento em particular, serão avaliadas apenas tendências graduais nas séries.

Variáveis hidrometeorológicas frequentemente não seguem a distribuição normal (HENSEL; HIRSCH, 2002; KUNDZEWICZ; ROBSON, 2004). Portanto, foram avaliadas tendências com testes estatísticos que não assumem uma distribuição específica dos índices anuais. Tendências em todos os índices, com exceção dos da categoria frequência do regime (i.e., dois índices de vazão e dois de chuva), foram calculadas usando três métodos, que segundo Kundzewicz e Robson (2004) são os mais populares em estudos de hidrologia: teste de Mann-Kendall, declividade de Theil-Sen, e correlação de Spearman. Tendências nos índices de frequência foram calculadas usando a regressão de Poisson, pois seu uso é recomendável para variáveis inteiras não negativas e de baixa contagem (e.g., Mallakpour e Villarini, 2015; Villarini et al., 2013). Os testes estatísticos são descritos nas próximas seções.

3.6.1 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) avalia se a série tem tendência monotônica, i.e., de apenas uma direção. A hipótese nula é que não há tendência na série temporal e a hipótese alternativa é que há tendência na série. O teste é definido como:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

onde n é comprimento da série (em anos, de 1980 a 2015), x_j e x_i são os valores sequenciais da série, e:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{caso } x_j > x_i \\ 0, & \text{caso } x_j = x_i \\ -1, & \text{caso } x_j < x_i \end{cases} \quad (7)$$

Para $n \geq 10$, espera-se distribuição normal de s , com média igual a zero e variância igual a:

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (8)$$

sendo m o número de grupos de valores repetidos na série, e t_i o número de valores repetidos no grupo i . O teste estatístico padronizado é calculado:

$$Z(\text{MK}) = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{V(s)}}, & \text{caso } s > 0 \\ 0, & \text{caso } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{V(s)}}, & \text{caso } s < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Com isso, o p-valor é retirado da tabela de distribuição normal padronizada a partir do valor de $Z(\text{MK})$. O teste, neste caso as tendências de mudanças graduais, são consideradas significativas se:

$$|Z(\text{MK})| > Z_{1-\alpha/2} \quad (10)$$

Portanto, a hipótese nula é rejeitada para um nível de significância α . Um valor de $Z(\text{MK})$ positivo indica uma tendência positiva, e um valor negativo indica uma tendência negativa.

O teste de Mann-Kendall identifica tendências em apenas uma direção da série, independente desta ser de alta ou de baixa magnitude. Como consequência, o teste: é pouco afetado por outliers na série; pode identificar uma tendência como significativa mesmo que seja de baixa magnitude; pode identificar uma tendência como não significativa mesmo que seja de alta magnitude (HENSEL; HIRSCH, 2002).

3.6.2 Declividade de Theil-Sen

Enquanto o teste de Mann-Kendall apenas identifica se a tendência é estatisticamente significativa ou não, a regressão linear de Theil-Sen (THEIL, 1950; SEN, 1968) identifica a magnitude desta

tendência. Ao contrário da regressão linear tradicional (i.e., dos mínimos quadrados), a regressão de Theil-Sen não exige distribuição normal dos resíduos e é pouco afetada por outliers. É calculada por:

$$b = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \forall i < j \quad (11)$$

onde x_j e x_i são o valor da série correspondente aos anos j e i respectivamente. A declividade b é o equivalente à mediana de todos os possíveis pares consecutivos de dados. Segundo Hensel e Hirsch (2002), a regressão linear de Theil-Sen é quase tão eficiente quanto a regressão linear tradicional quando a premissa de normalidade dos dados é verdadeira. Entretanto, quando a premissa pode ser confirmada, a regressão de Theil-Sen é mais eficiente que a regressão tradicional.

3.6.3 Correlação de Spearman

O terceiro método para verificar tendências é a correlação de Spearman. É um teste com base em classificação de postos, onde se verifica a correlação a série de dados e a variável do tempo (i.e., os anos). A hipótese nula é que não há tendência (i.e., a correlação é aproximadamente zero) e a hipótese alternativa é de que há tendência. É calculado com:

$$d = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(x_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)} \quad (12)$$

onde $R(x_i)$ é o posto do valor x_i correspondente ao ano i , e n é o tamanho da amostra. Sob a hipótese nula d tem distribuição normal, com média zero e variância igual a:

$$V(d) = \frac{1}{n - 1} \quad (13)$$

O teste estatístico padronizado é calculado:

$$Z(SR) = \frac{d}{\sqrt{V(d)}} \quad (14)$$

Com isso, da mesma forma que com o teste de Mann-Kendall, o p-valor é retirado da tabela de distribuição normal padronizada e considerado significativo para um nível de significância α se:

$$|Z(\text{SR})| > Z_{1-\alpha/2} \quad (15)$$

3.6.4 Regressão de Poisson

Variáveis representadas por valores inteiros não negativos, particularmente de baixa contagem, são melhor analisadas a partir da distribuição e da regressão de Poisson (WILKS, 2011). A estimativa das tendências pela regressão de Poisson foi aplicada aos índices com estas características: frequência anual de cheias, de chuvas intensas, de secas hidrológicas, e de eventos sem chuva.

Na regressão de Poisson, a taxa de ocorrência λ dos eventos é definida em função do tempo t (WILKS, 2011):

$$\lambda = \exp(\beta_0 + \beta_1 t_i) \quad (16)$$

onde os parâmetros β_0 e β_1 são estimados usando a máxima verossimilhança, e caso o coeficiente β_1 for significativo para um nível de significância α , rejeita-se a hipótese nula de que não há tendência na série. A variável dependente da regressão assume a distribuição de Poisson (WILKS, 2011), cujo único parâmetro λ da função de probabilidade é estimada com:

$$Pr\{X = x\} = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (17)$$

onde e é a base do logaritmo natural ($e = 2.718\dots$), e k é o número inteiro não negativo de ocorrências ($x = 0, 1, 2, \dots$).

3.6.5 Pre-whitening

Os métodos citados para verificar tendências assumem que a série temporal é independente. Para ser considerada independente, a série anual dos índices deve ter autocorrelação não significativa e próxima de zero. Portanto, as séries de todos os índices terão sua autocorrelação verificada e removida caso esta seja identificada como significativa. Uma possibilidade de remover a autocorrelação é agrupar a série em

blocos (e.g., 2 anos, 3 anos, etc.). Porém, este método reduziria o tamanho da série para menos de 20 amostras, tornando inadequada para analisar tendências. Outro método mais comumente aplicado é o *pre-whitening*, proposto por Von Storch (1995). Neste trabalho foi usado uma modificação, chamada *trend-free pre-whitening* (YUE et al., 2002), na qual a remoção da autocorrelação se dá em 5 passos:

(i) A tendência b da série X_t é computada usando a declividade de Theil-Sen;

(ii) Caso seja diferente de zero, a tendência identificada é removida da série, gerando uma nova série sem tendência:

$$X'_t = X_t - bt \quad (18)$$

onde b é a declividade de Theil-Sen, X_t é o valor da série correspondente ao tempo t .

(iii) A autocorrelação de passo igual a 1 ano é computada da série sem tendência X'_t gerada em (ii);

(iv) A autocorrelação é removida da série X'_t gerada em (ii):

$$Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1} \quad (19)$$

onde r_1 é a autocorrelação de passo igual a 1.

(v) A série Y'_t resultante em (iv) é novamente combinada com a tendência b identificada em (i):

$$Y_t = Y'_t + bt \quad (20)$$

Com isso, assumindo que não há autocorrelação em outros passos de tempo, a série Y_t deverá ser independente.

3.6.6 Reamostragem usando *bootstrap*

Os métodos para verificação de tendências citados são eficazes mesmo em séries que não seguem distribuição normal e possuem outliers. Porém, uma técnica robusta para identificar o nível de significância de um teste estatístico é a reamostragem usando *bootstrap* (EFRON; TIBSCHIRANI, 1998), sendo recomendada para variáveis hidrometeorológicas (KUNDZEWICZ; ROBSON, 2004). O *bootstrap* é

a geração de séries aleatórias, geradas a partir da série original e de mesmo tamanho, a partir do sorteio aleatório com reposição de seus elementos. A partir de uma série X , o *bootstrap* gera m séries independentes $X^{*1}, X^{*2}, \dots, X^{*m}$. Para cada nova série gerada, os testes estatísticos são realizados, e.g. para a declividade de Theil-Sen, $b^{*1}, b^{*2}, \dots, b^{*m}$. Ao ordenar estas declividades em ordem crescente pode ser obtida a função distribuição acumulada. Conforme Yue e Pilon (2004), o p-valor p_b da declividade b da série original pode ser estimada segundo:

$$p_b = \frac{m_b}{m} \quad (21)$$

onde m_b é o posto correspondente ao maior valor de $b^* \leq b$, e m é o número de reamostragens, i.e., de séries geradas. Em seguida, o p-valor é transformado para variar de 0 a 0,5:

$$p_b = \begin{cases} 1 - p_b, & \text{caso } p_b > 0,5 \\ p_b, & \text{caso } p_b \leq 0,5 \end{cases} \quad (22)$$

Com isso, caso p_b seja menor que 0,05, a tendência é significativa para o nível de significância α de 0,05. O mesmo pode ser computado para o teste de Mann-Kendall, correlação de Spearman, e regressão de Poisson. Apesar do *bootstrap* não assumir que a série tem distribuição normal, assume que seus dados são independentes. Portanto, antes de aplicar o *bootstrap* a série passou pelo *trend-free pre-whitening* citado anteriormente. Adicionalmente, foi adotado um m de 2000 reamostragens, pois Efron e Tibschirani (1998) sugerem entre 1000 e 2000 reamostragens para obter um intervalo de confiança entre 90 e 95%.

A ideia referente à aplicação do *bootstrap* é a seguinte: se determinada série não tem tendência (i.e., sua hipótese nula), então a ordem dos dados não deve ter grande influência sobre a tendência. Após cada reamostragem, o teste estatístico é refeito. Após várias reamostragens, o teste estatístico original é comparado aos das séries reamostradas. Caso o teste estatístico original seja substancialmente diferente da maioria dos testes das reamostragens, a ordem dos dados na série afeta a tendência, e com isso a hipótese nula pode ser rejeitada.

3.7 ANÁLISE DE CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO

Após as análises das tendências de chuva e vazão no Brasil, foi buscado quais fatores podem ter causado as mudanças na vazão. Tendências em apenas três dos índices de vazão foram consideradas na análise de causas: vazão média anual, pois indica a condição média da bacia e a total disponibilidade hídrica; vazão diária máxima anual, pois o maior evento do ano pode oferecer grandes riscos à sociedade; e vazão mínima anual de uma média móvel de 7 dias, pois este índice e outros semelhantes (e.g., vazão igualada ou excedida em 95% do tempo) são usados para definir a quantidade da vazão que pode ser outorgada, além de ser representativo da seca mais severa do ano.

A análise de causas das mudanças na vazão foi dividida em três etapas principais: (i) aquisição dos dados e cálculo dos índices das forçantes hidrológicas; (ii) espacialização destes índices, juntamente com a homogeneização da distribuição espacial das bacias hidrográficas, para que nenhuma região do país tenha influência predominante na análise; e (iii) a aplicação dos métodos para buscar relações entre as tendências na vazão e as forçantes hidrológicas selecionadas.

3.7.1 Escolha e cálculo dos índices das forçantes hidrológicas

A análise de causas buscou relações entre tendências na vazão (média, máxima, e mínima) e forçantes hidrológicas, categorizadas em fatores climáticos e não climáticos. Não foram consideradas as influências da fisiografia das bacias na propagação das forçantes hidrológicas em mudanças no regime de vazão. Portanto, os resultados podem ser significativamente alterados caso estas informações sejam incluídas na análise. Entretanto, argumenta-se que este trabalho analisou o comportamento médio das bacias hidrográficas brasileiras e que, caso sejam inseridas informações fisiográficas, seriam alterados particularmente resultados regionais.

Tendências em cada um dos três índices de vazão (i.e., variáveis dependentes) foi relacionado com um conjunto de índices das forçantes hidrológicas (i.e., variáveis independentes). Os índices da análise de causas estão na Tabela 4 e são descritos adiante no texto.

Tabela 4. Variáveis incluídas na análise de causas das tendências na vazão média anual, vazão diária máxima anual, e vazão mínima anual de 7 dias. As tendências na vazão representam as variáveis dependentes. As forçantes hidrológicas representam as variáveis independentes. Δ significa tendência ou mudança; Q significa vazão; P significa chuva; ET significa evapotranspiração; FN significa florestas naturais; e UHE significa Usinas Hidrelétricas de Energia.

Tendências na vazão	Forçantes hidrológicas				
	Fatores climáticos		Fatores não climáticos		
Δ na Q média	Δ na P média	Δ na ET média	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Captação de água
Δ na Q máxima	Δ no balanço de P e ET 7 dias antes da Q máxima	Δ no balanço de P e ET 30 dias antes da Q máxima	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Captação de água
Δ na Q mínima	Δ no balanço de P e ET 90 dias antes da Q mínima	Δ no balanço de P e ET 365 dias antes da Q mínima	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Captação de água

A escolha dos índices das forçantes hidrológicas se deu com os critérios:

(i): Menor quantidade de índices possível que melhor analise todas as forçantes hidrológicas, porém separadamente: mudanças na precipitação; mudanças na evapotranspiração; mudanças na cobertura da terra; e regulações diretas do ciclo hidrológico.

(ii): Citações na literatura como variáveis de impacto nas mudanças do regime de vazão.

(iii): Índices que representem fenômenos físicos das forçantes hidrológicas da forma mais simplificada possível. Isto exclui índices bem citados na literatura mas resultado de outras análises multivariadas, como o Índice de Budyko, que indica a relação entre evapotranspiração e chuva (BUDYKO, 1971).

(iv): Disponibilidade de dados para o período analisado, onde cada índice deve possuir apenas uma fonte de dados que abranja toda a área de estudo.

(v): Menor incerteza e maior resolução espacial dos dados.

As forçantes hidrológicas foram calculadas a partir de cinco fontes de dados: chuva (XAVIER et al., 2016); evapotranspiração (MIRALLES et al., 2011; MARTENS et al., 2017); cobertura da terra (MAPBIOMAS, 2018); hidrelétricas (ANEEL, 2018); e demandas hídricas (ANA, 2016). O controle de qualidade dos dados foi feito pelos próprios autores dos dados.

3.7.1.1 Índices dos fatores climáticos

As forçantes hidrológicas climáticas são mudanças na chuva e na evapotranspiração. Os dados de chuva possuem uma grade de dados de 0,25° de resolução espacial, ou aproximadamente 28 km na linha do equador (XAVIER et al., 2016). São dados diários, de 1980 a 2015, que se estendem por todo o território do Brasil. Estes dados foram interpolados a partir dos dados de chuva medidos pela ANA (XAVIER et al., 2016). Foi dada preferência aos dados de Xavier et al. (2016) em oposição à interpolação direta dos dados da ANA apresentados anteriormente na Figura 6. O motivo disto é porque Xavier et al. (2016) aplicaram seis métodos de interpolação dos dados e disponibilizaram apenas a de melhor resultado.

Os dados de evapotranspiração diária foram provenientes do modelo GLEAM (*Global Land Evaporation Amsterdam Model*; MIRALLES et al., 2011; MARTENS et al., 2017). Também possuem 0,25° de resolução espacial e são de 1980 a 2015. Estes dados foram feitos a partir de um conjunto de algoritmos, com base em dados de sensoriamento remoto, que estima os diferentes componentes da evapotranspiração. Dentre nove grandes bancos de dados de evapotranspiração disponíveis para uso, nenhum tem a melhor performance (LIU et al., 2016). Entretanto, o GLEAM tem a melhor resolução espacial (LIU et al., 2016), sendo, por isso, usado neste trabalho. Dentre todos os índices das forçantes hidrológicas, a evapotranspiração é a de maior incerteza, sendo subestimada principalmente em florestas próximas da linha do equador (LIU et al., 2016).

As tendências na vazão média anual foram relacionadas com tendências na chuva média anual e na evapotranspiração média anual de cada bacia. Todas estas tendências foram calculadas com a declividade de Theil-Sen. Gráficos com as séries temporais de chuva e evapotranspiração de cada bacia e suas tendências estão disponíveis no Anexo H.

As tendências das vazões máximas e mínimas são analisadas na escala de evento, i.e., mudanças no maior e no menor evento do ano. Por isso, as análises de causas destas mudanças foram investigadas com a inclusão de mudanças na chuva e na evapotranspiração também na escala de evento. As tendências na vazão máxima foram relacionadas com tendências no balanço de chuva e evapotranspiração cumulativas (i.e., o quanto choveu a mais que evapotranspirou na bacia) antes do dia da vazão máxima em duas escalas de tempo: 7 dias e 30 dias. Para as vazões mínimas, estas relações foram na escala de tempo de 90 e 365 dias. Por exemplo, em uma bacia, os passos para calcular a tendência no balanço de chuva e evapotranspiração 7 dias antes da vazão máxima foram: (i) no primeiro ano, a identificação do dia da vazão máxima; (ii) a diferença entre a chuva acumulada e a evapotranspiração acumulada 7 dias antes do dia da vazão máxima; (iii) a repetição dos passos (i) e (ii) para todos os anos da análise, formando uma série temporal com 36 amostras (1980 a 2015); (iv) o cálculo da tendência na série do balanço de chuva e evapotranspiração resultante de (iii), quantificada com Theil-Sen.

Vazões máximas ocorrem não apenas por causa das chuvas que levaram ao evento, mas também devido à condição de umidade da bacia antes destas chuvas (BLÖSCHL et al., 2015). A escolha das escalas de 7 e 30 dias da análise de causas das vazões máximas teve o objetivo de analisar esses dois fatores distintos. A escala de 7 dias é o indicador da chuva diretamente relacionada ao evento de cheia, i.e., a chuva que ocasionou a cheia. O ideal seria que o número de dias fosse obtido considerando o tempo de resposta de cada bacia. Porém, isto é dificultado pois estimativas do tempo de residência variam em até 500% dependendo do método de estimativa (GRIMALDI et al., 2012). Outros trabalhos geralmente relacionam vazões máximas com chuvas de até 15 dias de antecedência (e.g., MERZ et al., 2018), sendo 7 dias um valor comumente usado (e.g., BLÖSCHL et al., 2017). A escala de 30 dias do balanço de chuva e evapotranspiração é um indicador da umidade da bacia antecedente ao evento da máxima, apesar de também incluir no balanço a chuva de 7 dias antes do evento. Não há concordância na literatura sobre quantos dias devem ser analisados, sendo assim, adotou-se 30 dias por ser comumente usado em outros estudos (e.g., BLÖSCHL et al., 2017).

As vazões mínimas podem ser resultado de secas, eventos lentos e duradouros, geralmente com duração de meses ou até mesmo de anos. As secas ocorrem de formas distintas particularmente em função da sazonalidade da chuva (VAN LOON, 2015). Em bacias com baixa

sazonalidade, o principal fator de secas hidrológicas e consequentemente de vazões mínimas são chuvas abaixo do esperado para certa estação do ano, possivelmente combinadas com maior evapotranspiração. Por outro lado, em bacias com alta sazonalidade, a maior recarga do aquífero ocorre na estação úmida. Se a estação úmida tiver chuvas abaixo do esperado, sua consequente menor recarga influencia as condições da estação seca e da vazão mínima (VAN LOON, 2015). Por isso, tendências no balanço de chuva e evapotranspiração das vazões mínimas foram calculadas considerando 90 dias antecedentes, buscando representar as bacias com baixa sazonalidade; e 365 antecedentes, buscando representar as bacias com alta sazonalidade.

3.7.1.2 *Índices dos fatores não climáticos*

Mudanças na cobertura da terra foram computadas com a diferença de dois mapeamentos do MapBiomas (2018), um referente a 1985 e outro a 2015. O MapBiomas (2018) usou dados do *Landsat*, com resolução espacial de 30 metros, para classificar as coberturas da terra do Brasil em pastagem, floresta, urbano, cultura agrícola, entre outros. O índice usado como forçante hidrológica foi de mudança na cobertura de florestas naturais, pois é frequentemente relacionada com mudanças no regime de vazão (BRUIJNZEEL et al., 2005). A incerteza das classificações de florestas naturais pelo MapBiomas é de cerca de 10%.

A regulação direta no ciclo hidrológico foi a única componente das forçantes hidrológicas com dois índices, visto a complexidade desta variável: construção de hidrelétricas e captação de água. No caso das hidrelétricas, foram usados dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (ANEEL, 2018). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015) define como UHE apenas os maiores empreendimentos, com potência acima de 30 mil KW ou com área do reservatório maior que 13 km². Os menores empreendimentos em desacordo com estas exigências somam cerca de mil casos (ANEEL, 2018). A ONS disponibiliza dados como geração total de energia e o ano de construção de cada UHE. Estes dados não são disponíveis por completo para os empreendimentos menores que as UHE. Por isso, apenas UHE foram consideradas neste trabalho, sendo o índice relativo à geração total das UHE criadas entre 1980 e 2015. A ausência dos demais empreendimentos é uma grande fonte de incerteza deste trabalho.

O outro índice da regulação direta no ciclo hidrológico é a captação de água pela sociedade, i.e., demanda hídrica. É o único índice que não representa uma mudança durante o período analisado, pois não foram encontrados dados deste tipo. O índice usado foi a demanda hídrica total por bacia no ano de 2014. Os dados são da base de demandas de recursos hídricos do Brasil (ANA, 2016). A resolução espacial é de microbacias, o que é semelhante a uma grade de 1 km de resolução. Se trata da demanda hídrica consuntiva (i.e., que não retorna à fonte de retirada), calculado principalmente com a soma da demanda para abastecimento urbano e rural, dessedentação animal, e irrigação (ANA, 2016). As principais fontes destes cálculos são dados de outorga, mapeamentos de pivôs de irrigação, censos urbanos, e censos agropecuários (ANA, 2016).

3.7.2 Homogeneização da distribuição espacial das bacias

Antes de relacionar as tendências de vazão com as forçantes hidrológicas foi feita a homogeneização da distribuição espacial das bacias. As 779 bacias incluídas nos cálculos das tendências de vazão têm maior concentração no Sul e no Sudeste do Brasil (Figura 14a). Verificando as áreas das bacias hidrográficas sobrepostas (Figura 14c), nota-se que as bacias grandes (maiores que 30 mil km²) estiveram concentradas nas bacias do São Francisco e do Amazonas. Para que nenhuma destas regiões tenha maior peso na análise de causas, o número de bacias para a análise de causas foi reduzido (Figura 14b).

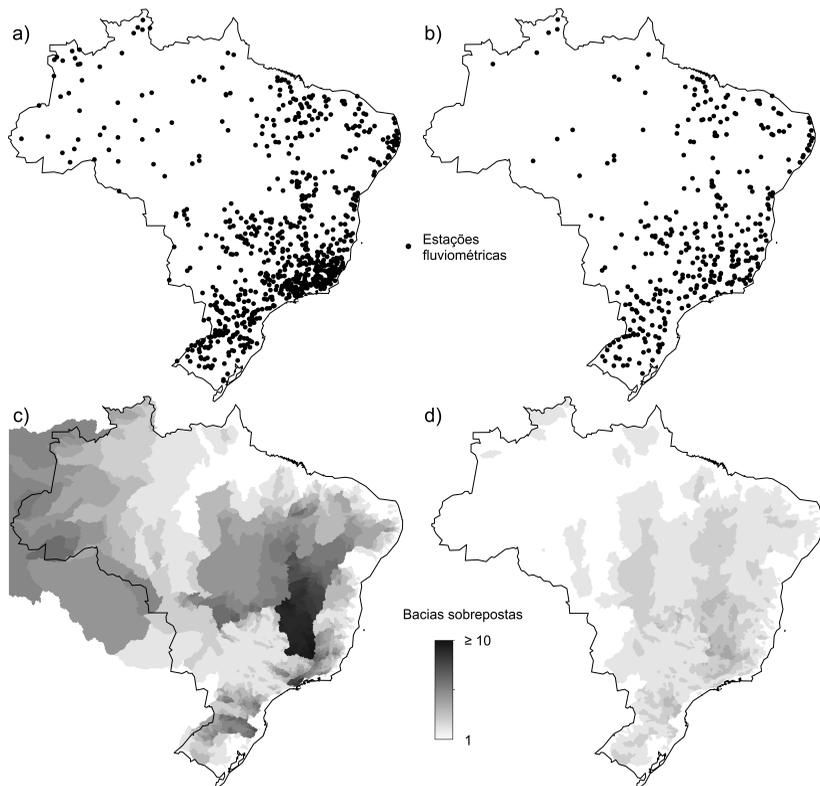
A homogeneização foi feita com: remoção de estações de medição no mesmo canal com grande proximidade; remoção de bacias com menos de 500 km², devido à resolução espacial de 28 km (ou 784 km²) dos dados de chuva e evapotranspiração; e remoção das bacias que não estão inteiramente incluídas no Brasil, pois as informações de hidrelétricas, demandas hídricas, e coberturas da terra só estão disponíveis no território brasileiro. Disto resultaram 354 bacias que foram usadas na análise de causas. Nota-se que, após a homogeneização, as áreas com bacias sobrepostas foram substancialmente reduzidas (Figura 14d).

3.7.3 Relações entre tendências de vazão e forçantes hidrológicas

Foram usados quatro métodos para analisar relações entre as tendências na vazão e as forçantes hidrológicas: (i) correlação de Spearman, segundo as equações 12 a 15 apresentadas anteriormente; (ii)

gráficos de dispersão; (iii) classificação de bacias, que será explicado em maiores detalhes juntamente com os resultados (Seção 6); e (iv) regressão multivariada, segundo a descrição abaixo.

Figura 14. Localização das (a) 779 estações medição de vazão antes da homogeneização da distribuição espacial de bacias e (b) 354 estações após a homogeneização. Sobreposição das áreas das bacias (c) antes e (d) após a homogeneização.



A regressão multivariada foi usada para analisar relações lineares entre uma variável dependente (i.e., tendências de vazão) e diversas variáveis independentes (i.e., índices das forçantes hidrológicas). Neste trabalho, foram feitas três regressões, uma para cada linha da Tabela 4 mostrada anteriormente. Por exemplo, as tendências na vazão média (ΔQ_{med}) tiveram o modelo estatístico na forma:

$$\Delta\widehat{Q}_{med} = b_0 + b_1 \Delta P_{med} + b_2 \Delta ET_{med} + b_3 \Delta UHE + b_4 \Delta FN + b_5 DMD \quad (23)$$

onde $\Delta\widehat{Q}_{med}$ são as tendências modeladas na vazão média; ΔP_{med} são as tendências na chuva média; ΔET_{med} são as tendências na evapotranspiração média; ΔUHE são construções de hidrelétricas; ΔFN são mudanças na cobertura de florestas naturais; DMD são demandas hídricas da bacia; e b_1 a b_5 são os coeficientes das respectivas variáveis. Os coeficientes indicam que, por exemplo com o b_1 , caso as demais variáveis independentes sejam inalteradas e haja alteração em uma unidade de ΔP_{med} , haverá mudanças em um b_1 na $\Delta\widehat{Q}_{med}$.

Como o número de variáveis é pequeno para o de amostras (i.e., 71 amostras por variável independente), foram incluídas todas as variáveis no modelo. A regressão foi feita com o pacote *StatsModels* em *Python* (STATSMODELS, 2019), que estima os coeficientes da regressão com o método dos mínimos quadrados. O modelo foi interpretado com os resíduos padronizados e com o coeficiente de determinação ajustado (R_a^2). Os resíduos padronizados são a diferença entre os valores observados (e.g., ΔQ_{med}) e os valores modelados (e.g., $\Delta\widehat{Q}_{med}$), proporcional ao desvio padrão. O coeficiente de determinação ajustado varia de 0 a 1 e indica o ajuste do modelo, i.e., o quanto da variância das observações foi explicada pelo modelo. É calculado com:

$$R_a^2 = 1 - \frac{n - 1}{n - (k + 1)} \cdot \frac{SQ_{RES}}{SQ_{TOT}} \quad (24)$$

onde n é o número de amostras, k é o número de variáveis independentes, SQ_{RES} é a soma dos quadrados dos resíduos, e SQ_{TOT} é a soma total dos quadrados. SQ_{RES} e SQ_{TOT} são dados por:

$$SQ_{TOT} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (25)$$

$$SQ_{RES} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (26)$$

onde y_i são os valores observados, \bar{y}_i é a sua média, e \hat{y}_i são os valores estimados.

Para que a regressão seja corretamente estimada, é necessário cumprir quatro premissas (HAIR et al., 2014): (i) linearidade do fenômeno observado, pois se trata de um modelo linear; (ii) independência dos resíduos; (iii) distribuição normal dos resíduos; e (iv) variância constante dos resíduos. A primeira premissa é cumprida aproximando todas as variáveis da distribuição normal. Para isto, foi usado a transformação com Box-Cox, que aproxima os dados da normal aplicando o logaritmo natural ou um expoente nos dados. Após o Box-Cox, foi utilizado o gráfico de probabilidade normal para a remoção de outliers.

As três demais premissas da regressão foram verificadas com os gráficos: (i) valores observados versus os valores modelados; erros padronizados versus (ii) os valores modelados e versus (iii) as variáveis independentes; e (iv) gráfico de probabilidade normal dos erros padronizados.

As variáveis não possuem uma unidade de medida em comum. Então, para fazer uma comparação entre os coeficientes da regressão, todas as variáveis foram padronizadas. Cada variável foi centralizada (i.e., foi subtraído sua média) e dividida pelo seu desvio padrão. Depois da primeira estimativa dos coeficientes da regressão, foram removidas as amostras com resíduos padronizados acima de 2 ou abaixo de -2. Após esta remoção, os coeficientes da regressão foram estimados novamente.

A interpretação da regressão pode ser problemática caso haja alta multicolinearidade, i.e., caso haja alta correlação entre as variáveis independentes. Os efeitos da multicolinearidade na regressão foram estimados com o fator de inflação da variância (VIF). O VIF de cada variável independente j é estimado com:

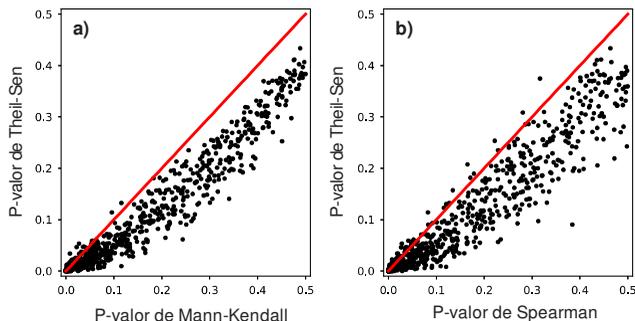
$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (27)$$

onde R_j^2 é o coeficiente de determinação da variável j sobre as demais variáveis independentes. A raiz quadrada do VIF indica o quanto os resíduos padronizados da regressão foram inflados por causa da multicolinearidade. Um VIF abaixo de 3 indica multicolinearidades pouco problemáticas (HAIR et al., 2014).

4 RESULTADOS DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA E VAZÃO

Com exceção dos índices da categoria frequência, que tiveram tendências calculadas com a regressão de Poisson, todos os demais índices tiveram tendências calculadas com os métodos de Theil-Sen, Mann-Kendall, e Spearman. Os três métodos apresentaram resultados semelhantes. Por exemplo, as tendências na vazão média anual tiveram correlação entre os p-valoros com Theil-Sen e com Mann-Kendall de 0,98 (Figura 15a). Entre Theil-Sen e Spearman, esta correlação foi de 0,99 (Figura 15b). Nota-se que os p-valoros de Theil-Sen tendem a ser mais baixos que os de Mann-Kendall e de Spearman. O método de Theil-Sen teve o maior número de tendências significativas ($\alpha = 0,05$), seguido por Spearman, e por último Mann-Kendall. O mesmo foi observado nas tendências nos demais índices, ambos para chuva e vazão (não mostrado). Apesar de Theil-Sen ter o maior número de tendências significativas, os três métodos trouxeram resultados semelhantes cujas diferenças pouco interferem na interpretação das tendências. Como o objetivo deste trabalho é a análise espacial das tendências, foi dado enfoque apenas no método de Theil-Sen pois é o único que estima a significância estatística das tendências e suas respectivas magnitudes.

Figura 15. (a) Dispersão entre os p-valoros das tendências na vazão média anual de Theil-Sen e de Mann-Kendall de todas as bacias. (b) Dispersão entre os p-valoros das tendências na vazão média anual de Theil-Sen e de Spearman de todas as bacias.



Tendências estão espacializadas como o exemplo na Figura 16. A Figura 16 mostra tendências nos índices de chuva de condições médias. Tendências nos índices de sazonalidade estão representadas em tons de verde e roxo. Nos demais índices, cores azuis mostram tendências indicando mais água (e.g., mais cheias ou menos secas) ou menor

variabilidade (e.g. menor desvio padrão ou maior autocorrelação). Portanto, a legenda de cores frequentemente é invertida, principalmente entre índices de condições altas e de condições baixas. A legenda de cores está classificada segundo o desvio padrão da respectiva tendência. Exceto quando indicado, a magnitude de cada tendência está representada com relação ao valor mediano da série anual, i.e., as tendências estão representadas em $\% \text{ ano}^{-1}$. No exemplo da Figura 16a, uma estação pluviométrica com chuva anual mediana de 1500 mm ano^{-1} e tendência de -10 mm ano^{-1} é representada com tendência de $-0,67\% \text{ ano}^{-1}$. A mediana da série anual de todas as estações de medição estão no Apêndice C para os índices de condições médias, no Apêndice D para condições altas, e no Apêndice E para condições baixas. Gráficos com a série temporal dos índices, a mediana da série, e as tendências estão apresentadas no Anexo F para cada estação pluviométrica, e no Anexo G para cada estação pluviométrica.

4.1 TENDÊNCIAS NOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES MÉDIAS

Na maior parte do Brasil predominou redução na chuva e vazão média anual (Figuras 16a e 17a). As tendências de vazão mostram isto mais claramente, pois possuem maior concordância espacial que as tendências de chuva. As mudanças na vazão média foram mais intensas que na chuva média, sendo frequentemente maiores que 1% ao ano.

Figura 16 (próxima página). Tendências de Theil-Sen da (a) chuva média anual, (b) desvio padrão da chuva diária, (c) sazonalidade da chuva média, e (d) centroide da chuva diária. Os símbolos preenchidos indicam tendências significativas para o nível de 95% . Os boxplots representam as tendências de cada região hidrográfica, coloridos segundo a Figura 6. A barra intermediária dos boxplots indicam a mediana, as caixas indicam os percentis 25 e 75, e os bigodes têm extensão máxima de duas vezes o intervalo entre quartis. Para melhor visualização, outliers não foram inclusos nos boxplots. AL significa região hidrográfica do Atlântico Leste; AM da bacia do Amazonas; AN do Atlântico Norte; AS do Atlântico Sul; PR da bacia do Paraná; SF da bacia do São Francisco; TO da bacia do Tocantins-Araguaia; UR da bacia do Uruguai.

Figura 16.

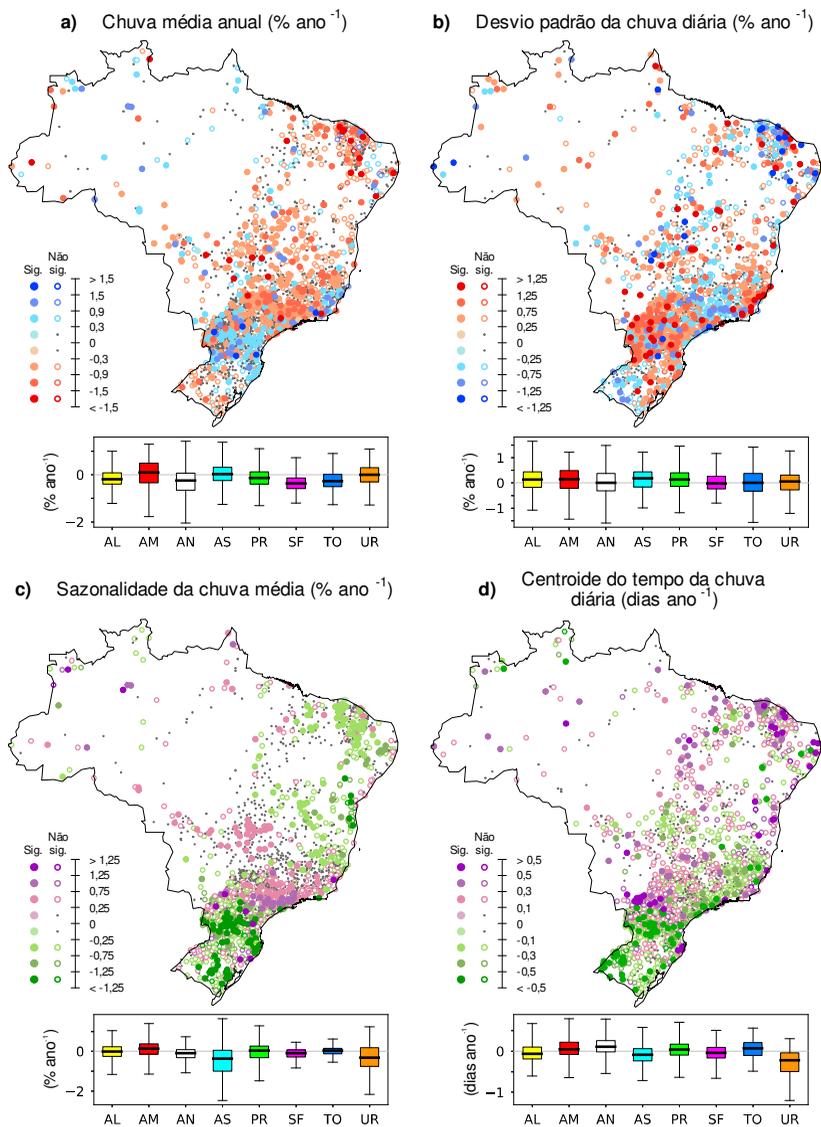
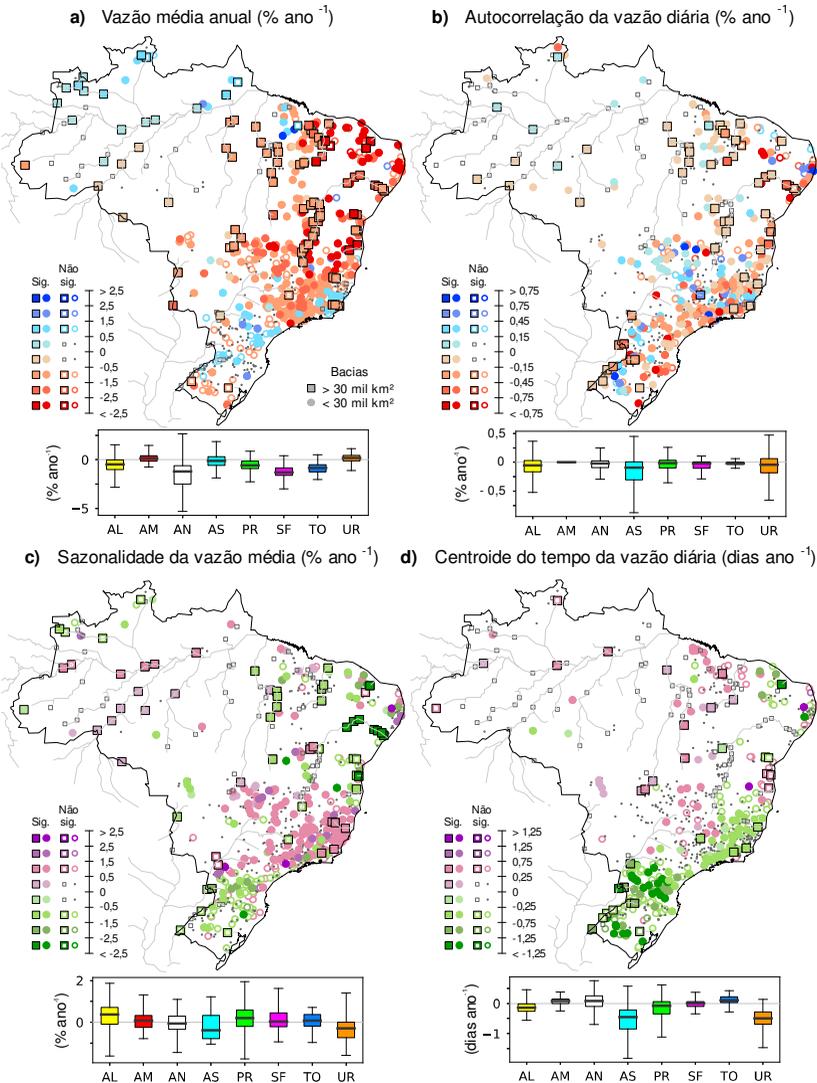


Figura 17. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão média anual, (b) autocorrelação da vazão diária, (c) sazonalidade da vazão média, e (d) centroide da vazão diária. Os símbolos preenchidos indicam tendências significativas para o nível de 95%. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza. A descrição dos boxplots é a mesma da Figura 16.



Reduções na chuva e vazão média anual predominaram por todo o Cerrado e Semiárido. Estas áreas são justamente as de menor chuva e vazão média anual (Figuras C1a e C2a no Apêndice C). As regiões hidrográficas do Atlântico Leste (AL), Atlântico Norte (AN), bacia do Paraná (PR), bacia do São Francisco (SF) e bacia do Tocantins (TO) tiveram redução em mais de 75% das estações de medição de chuva e vazão. As mudanças mais críticas ocorreram no AN, SF, TO, e alto PR, cuja mediana das tendências na vazão média foi de aproximadamente -1% por ano. Ao longo de 35 anos, isto representa uma redução cumulativa de 35% na vazão média.

As únicas regiões com aumento na chuva e vazão média foram partes da bacia do Amazonas (AM), do Sul do Brasil, e da fronteira entre RJ, ES, e MG. A AM e o Sul do Brasil são justamente as áreas do país com as maiores chuvas e vazões médias anuais (Figuras C1a e C2a no Apêndice C). Portanto, desde 1980 houve aumento no gradiente da chuva e vazão média (i.e., na diferença entre os maiores e os menores valores) no país desde 1980. Tal resultado sugere que o Brasil esteve passando por uma intensificação do ciclo hidrológico nas últimas décadas.

O desvio padrão da chuva diária não teve tendência predominante no país ou em qualquer região hidrográfica (Figura 16b). Nota-se que houve aumento onde a chuva média aumentou, embora o oposto não seja verdadeiro. Por outro lado, a autocorrelação da vazão diária teve redução por toda a costa brasileira, particularmente no Atlântico Sudeste (AS) e AL (Figura 17b). As maiores mudanças ocorreram em bacias menores que 30 mil km², sendo estas também as bacias com as menores autocorrelações médias (Figura C2b no Apêndice C). Dentre todos os índices de chuva e vazão analisados neste trabalho, a autocorrelação foi o único com tendências semelhantes por toda a costa do país. Isto indica que, na costa do Brasil, a vazão esteve ficando com maior variação entre um dia e outro. Tal fenômeno não é investigado com profundidade neste trabalho e é uma oportunidade para futuros estudos.

Mudanças na sazonalidade da chuva e da vazão média estiveram presentes por todo o Brasil (Figuras 16c e 17c), mas não tiveram um sinal predominante (i.e., positivo ou negativo). De maneira geral, mudanças na sazonalidade da vazão acompanharam as da chuva, porém com uma maior intensidade. O Sul do país e grande parte do AN ficaram com chuvas e vazões médias menos sazonais. Estas estiveram se concentrando mais no começo do ano hidrológico de Set-Ago no Sul do Brasil, e mais no fim do ano hidrológico no AN (Figuras 16d e 17d). Dentre as áreas com diminuição na chuva e vazão média anual, apenas

os estados de São Paulo (SP) e Goiás (GO) tiveram aumentos na sazonalidade. Isto indica que, em SP e GO, a redução na chuva e vazão da estação seca do ano foi maior que da estação úmida. Entretanto, os fenômenos por trás destas tendências podem não ser os mesmos, pois o centroide da chuva diária teve tendências diferentes em SP e GO.

No caso da AM, mudanças de chuva são difíceis de interpretar devido à baixa densidade de estações de medição. As tendências na vazão mostram que as partes Norte e Sul da AM são diferenciadas: o Norte teve maior vazão média anual e menor sazonalidade, indicando o aumento da vazão do período mais seco do ano; e o oposto no Sul, indicando redução da vazão do período mais seco do ano.

4.2 TENDÊNCIAS NOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES ALTAS

Tendências nos índices de chuva de condições altas são pouco conclusivas devido à baixa concordância espacial. As mudanças na chuva máxima anual tiveram medianas próximas de zero em todas as regiões hidrográficas (Figura 18a). O mesmo ocorreu com a frequência anual de chuvas intensas (Figura 18c). A única exceção ocorreu em partes do Sul do Brasil e na fronteira entre RJ, ES, e MG, onde houve aumento em ambos os índices. A sazonalidade da chuva máxima anual também teve mudanças pouco consistentes, com exceção da região hidrográfica do Uruguai (UR), onde a chuva máxima passou a ocorrer mais no começo do ano hidrológico de Set-Ago (Figura 18b). Além de alguns casos isolados, a duração da chuva intensa de maior duração do ano pouco mudou em todo o país (Figura 18d), mostrando que raramente ultrapassam a duração de 2 a 3 dias.

Semelhante ao observado anteriormente para as condições médias, as vazões de condições altas tiveram predominância de redução no Brasil (Figura 19). Mudanças nas condições altas de vazão estiveram pouco relacionadas ao correspondente da chuva. A vazão máxima anual e a frequência de cheias pouco mudou no Sul do Brasil (Figura 19a). Na fronteira entre RJ, ES, e MG a vazão máxima aumentou em mais de 30% nas últimas décadas, porém a frequência de cheias reduziu drasticamente (Figura 19c). As regiões com aumentos na frequência de cheias foram também as com a menor frequência anual de cheias do Brasil (Figura D2c no Apêndice D), indicando que estes aumentos foram pouco substanciais, apesar de estatisticamente significativas. A AM teve aumentos estatisticamente significativos na vazão máxima, apesar destas serem graduais e de baixa intensidade (i.e.,

Figura 18. Tendências de Theil-Sen da (a) chuva diária máxima anual, (b) dia da chuva máxima de uma média móvel de 5 dias, (d) chuva intensa de maior duração do ano. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de chuvas intensas. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 16.

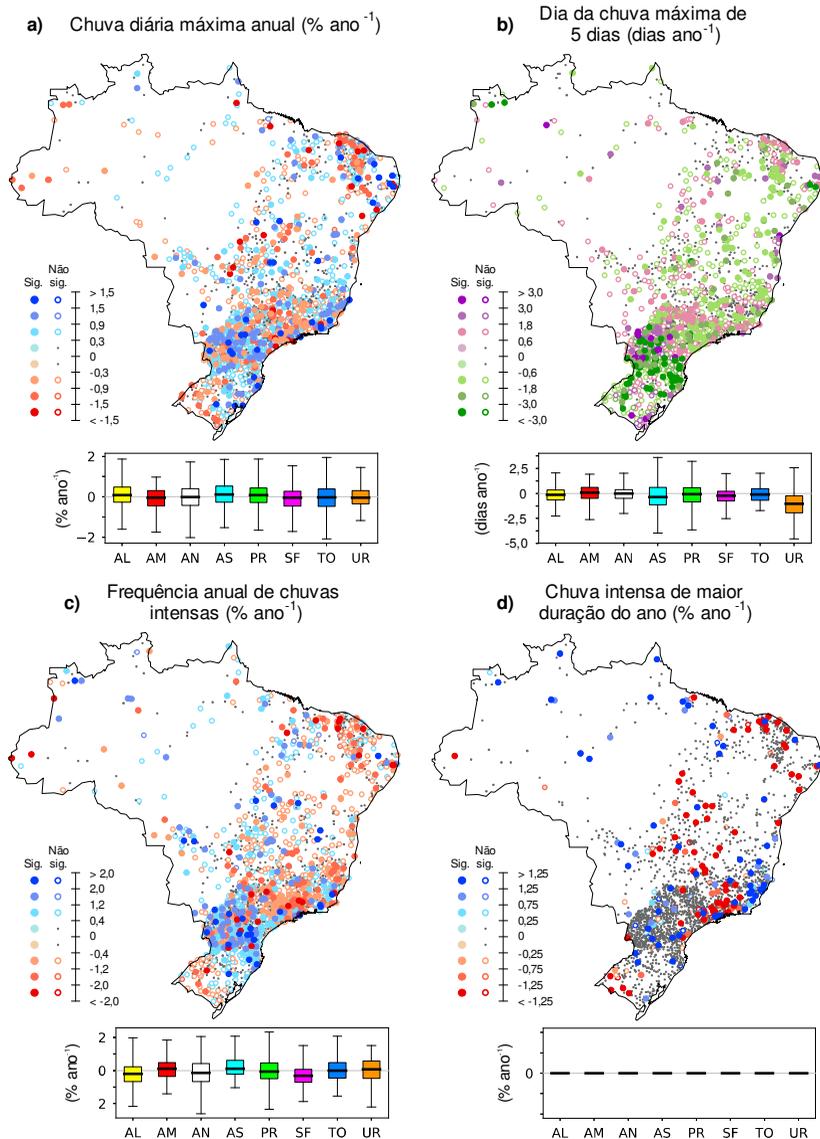
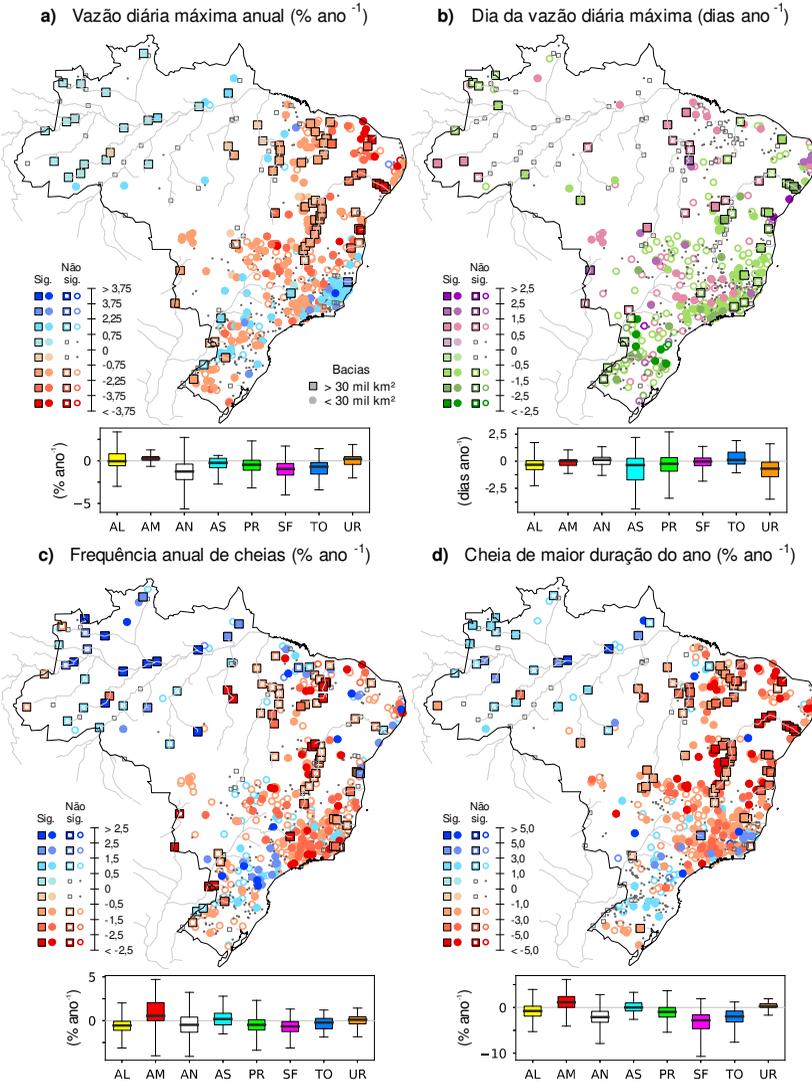


Figura 19. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão diária máxima anual, (b) dia da vazão diária máxima anual, e (d) cheia de maior duração do ano. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de cheias. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 17.



menor que 0,75% por ano). A duração das cheias na AM aumentou substancialmente (Figura 19d). Considerando que são bacias excepcionalmente grandes, as maiores cheias na AM têm mais de 30 dias de duração (Figura D2d no Apêndice D). Estas mudanças na AM mostram que o auge da estação úmida se prolongou nas últimas décadas.

4.3 TENDÊNCIAS NOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES BAIXAS

Dentre as tendências nos índices de chuva de condições baixas, a mais notável é na duração média dos eventos sem chuva (Figura 20). Além da chuva média anual ter diminuído na maior parte do país, as chuvas também passaram a ter mais dias de espaçamento entre si (Figura 20d). As regiões hidrográficas do AL, PR, SF, e TO são as mais críticas, onde mais de 75% das estações de medição tiveram aumento neste índice. Parte do estado de GO teve aumento cumulativo de mais de 30% nos últimos 35 anos, indicando que as chuvas após 2015 ocorrem com intervalos entre si aproximadamente 3,5 dias a mais que em 1980. Somado a isso, GO passou a ter o evento sem chuva de maior duração iniciando cada vez mais cedo no ano hidrológico de Mar-Fev (Figura 20b). Parte do Sul do Brasil e a fronteira entre RJ, ES, e MG tiveram aumento na duração do intervalo entre chuvas apesar de aumento na chuva média anual. Portanto, as chuvas em ambas regiões ficaram com maiores intensidades, explicando o aumento na chuva média entre os percentis 0 e 20 (Figura 20a).

Anteriormente, a substancial redução da vazão média anual no Cerrado e Semiárido indicaram uma situação alarmante para os recursos hídricos. Esta situação é reforçada ainda mais com as mudanças nas vazões de condições baixas (Figura 21). Houve redução na vazão mínima anual, aumento na duração de secas, e aumento na frequência de secas em mais de 75% das estações de medição do AL, AN, PR, SF, e TO. Cerca de 48,8% das estações de vazão do Brasil analisadas (i.e., 448 de 779) tiveram redução estatisticamente significativa na vazão mínima anual. Destas, 75 bacias tiveram diminuição da vazão mínima em mais de 3% ao ano. Isto significa que, desde 1980, 9,6% das 779 bacias analisadas passaram a ter vazão virtualmente igual a zero em períodos de seca. Antes destas tendências, apenas 18 bacias atingiam vazão zero nas secas (Figura E2a do Apêndice E). Caso estas tendências se estendam aos próximos anos, a disponibilidade hídrica poderá ficar em situação crítica no Sudeste, Nordeste, e em partes do Cerrado.

Figura 20. Tendências de Theil-Sen da (a) chuva média entre os percentis 0 e 20, (b) dia do início do evento sem chuva de maior duração do ano, e (d) duração média anual dos eventos sem chuva. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de eventos sem chuva. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 16.

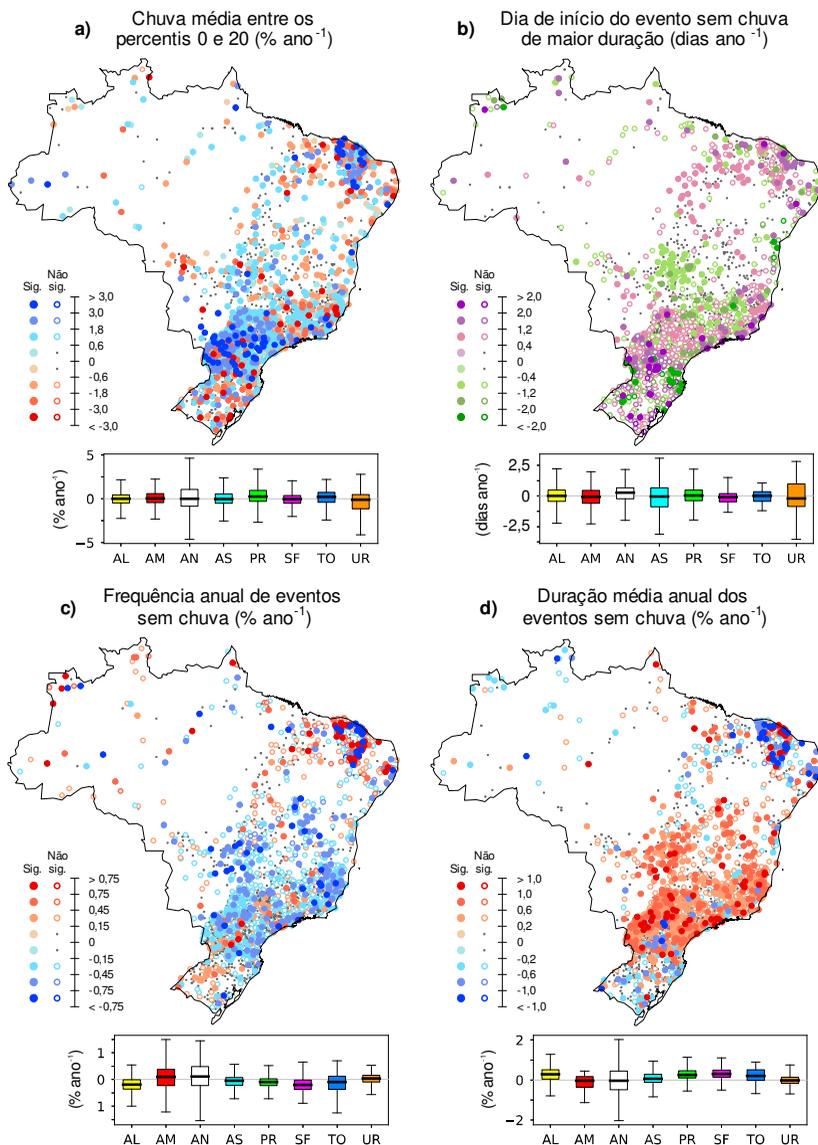
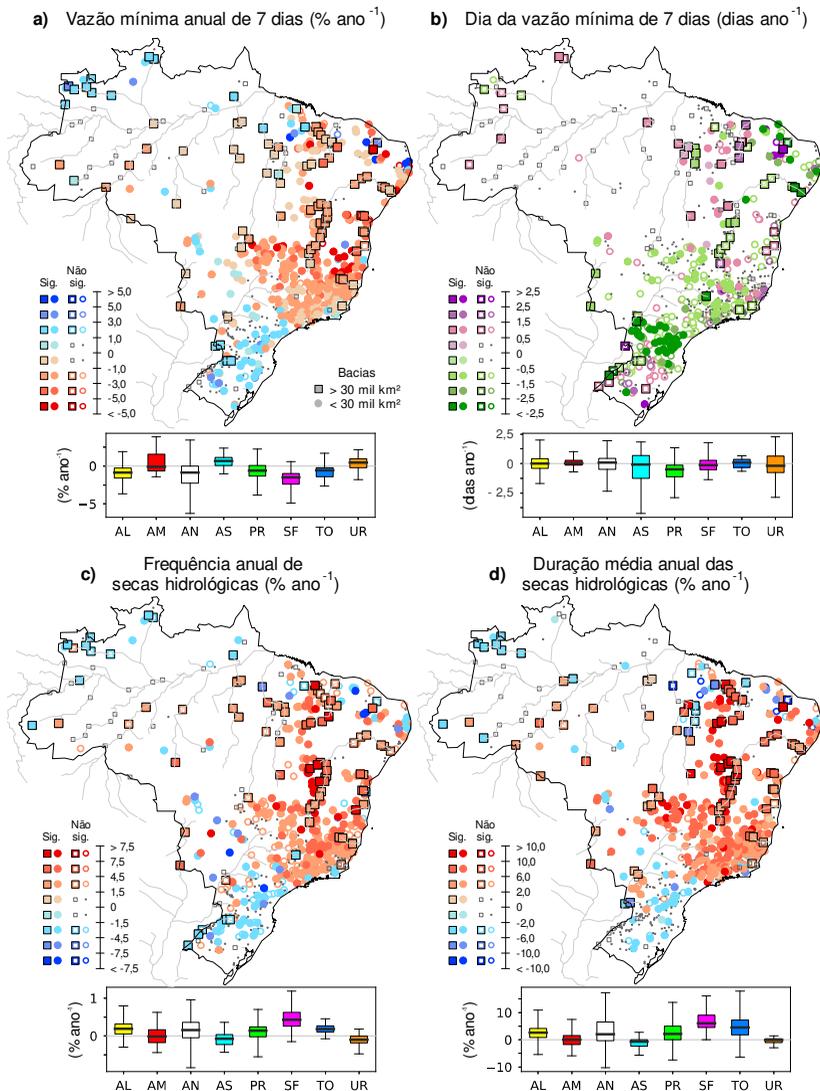


Figura 21. Tendências de Theil-Sen da (a) vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (b) dia da vazão mínima da média móvel de 7 dias, e (d) duração média anual das secas hidrológicas. (c) Tendências de Poisson da frequência anual de secas hidrológicas. A descrição dos demais itens é a mesma da Figura 17.



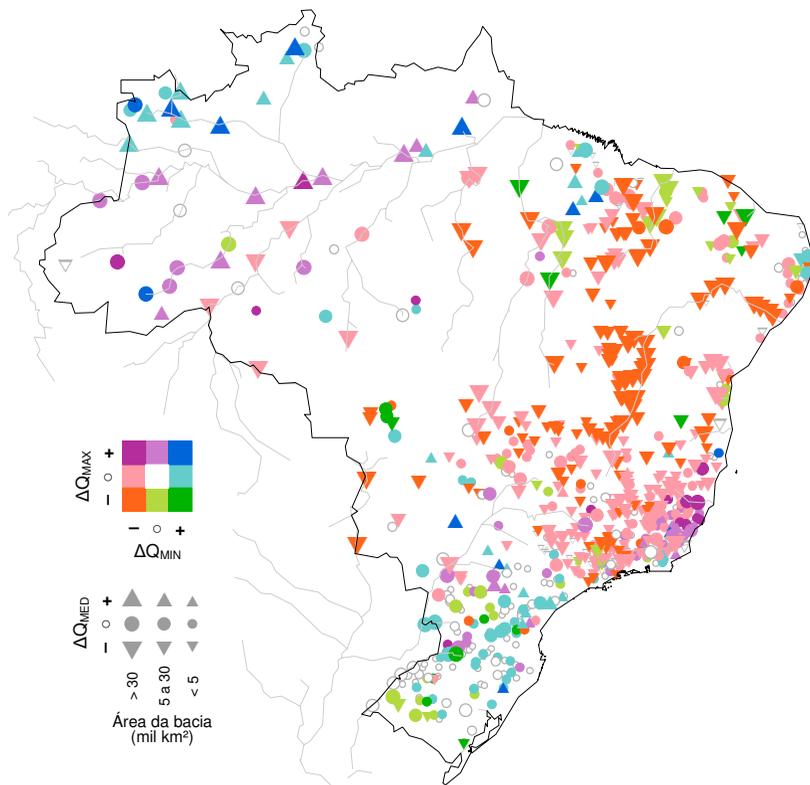
A vazão mínima anual aumentou significativamente no AS, UR, e no norte do AM. No Sul do Brasil, o aumento da vazão mínima e a ausência de mudanças consistentes na vazão máxima reforçam que houve redução na sazonalidade da chuva e da vazão média. Nas regiões do UR e PR, o período de ocorrência da vazão mínima anual passou a ocorrer mais cedo no ano hidrológico de Mar-Fev, mas o período de ocorrência do maior evento sem chuva do ano pouco mudou (Figura 21b). Isto mostra que mudanças na sazonalidade de condições baixas de chuva e vazão não estão necessariamente relacionadas.

4.4 BALANÇO GERAL DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA E VAZÃO

Para sintetização, as tendências em um índice de cada condição (i.e., médias, altas, baixas) foram inseridas na Figura 22 para a vazão e Figura 23 para a chuva. A Figura 22 mostra as tendências na vazão máxima anual e na mínima anual em uma legenda bivariada de cores. Por exemplo, a cor roxa indica as bacias com tendências estatisticamente significativas ($\alpha = 0,05$ com Theil-Sen) de redução na vazão mínima anual e de aumento na vazão máxima anual. Em adição, a legenda de símbolos indica tendências na vazão média e a área da bacia.

Na Figura 22 são ressaltados alguns padrões espaciais mais claramente que nas figuras anteriores. Nota-se a alarmante redução na vazão média e mínima no Sudeste do país, no Nordeste, e no Cerrado. De todas as 779 estações fluviométricas analisadas, 80,5% tiveram mudança significativa em pelo menos um dos três índices. Se desconsiderar as bacias do Sul do Brasil, este valor sobe para 88,0% (i.e., 546 de 620). Em outras palavras, a não-estacionariedade das séries de vazão é quatro vezes mais comum que a estacionariedade. O Sul do Brasil e do estado de SP é a região com tendências menos problemáticas à sociedade, onde predominam pouca mudança ou apenas aumento na vazão mínima. No Brasil, poucas bacias tiveram aumentos em ambos os extremos de vazão, i.e., aumento na máxima e redução na mínima. Este aumento ocorreu apenas em 2,2% das bacias, estando concentradas principalmente na fronteira entre RJ, ES, e MG. Qualitativamente, nota-se que mudanças na região hidrográfica da AM podem ser divididas em três partes: o Norte com aumento na vazão média, mínima, e em menor consistência nas vazões máximas; o Oeste e o canal principal do rio Amazonas com aumento nas máximas, e em menor consistência o aumento na vazão média; o Sul com redução na vazão média e mínima.

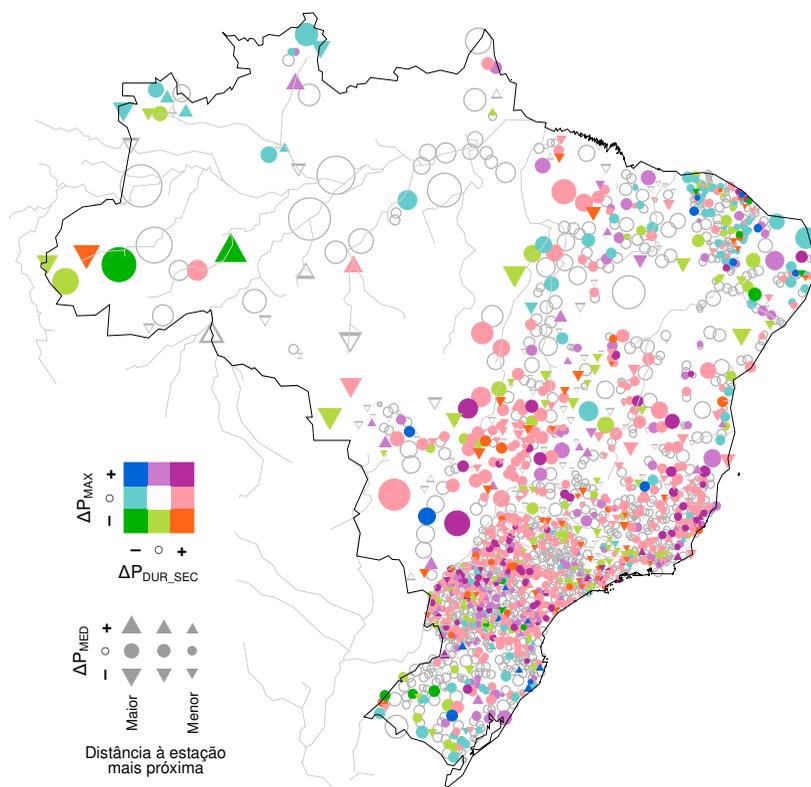
Figura 22. Tendências na vazão média anual (ΔQ_{med}), na máxima diária anual (ΔQ_{max}), e na mínima anual da média móvel de 7 dias (ΔQ_{min}). Tendências significativas (Theil-Sen, alpha de 0,05) de aumento (+), de redução (-), ou não significativas (o) são representadas pela sequência bivariada de cores para a ΔQ_{max} e ΔQ_{min} ; e são representadas pelo formato do símbolo para a ΔQ_{med} . O tamanho do símbolo indica a área da bacia.



No caso da chuva, nota-se novamente que a concordância espacial das tendências não foi tão clara quanto da vazão (Figura 23). A não-estacionariedade das séries de chuva é substancialmente menor que de vazão: 59% das 2323 estações pluviométricas tiveram tendência significativa em pelo menos um dos três índices. O Nordeste do país teve grande heterogeneidade espacial das tendências, embora predomine menos chuvas. As mudanças de chuva mais consistentes foram no Sudeste do Brasil e na região do Cerrado próximo ao estado de GO, onde predominou menores chuvas médias e maiores intervalos entre

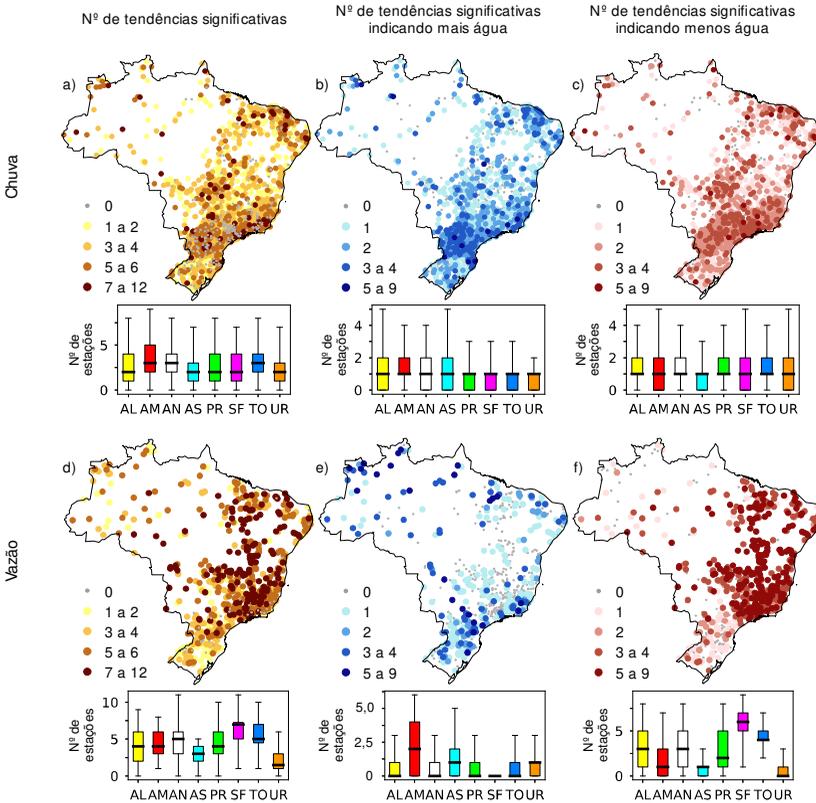
chuvas. No Sul do Brasil, a maior frequência de mudanças na parte norte e menor frequência na parte sul tiveram como zona de transição o estado de Santa Catarina.

Figura 23. Tendências na chuva média anual (ΔP_{med}), na máxima diária anual (ΔP_{max}), e na duração média anual dos eventos sem chuva (ΔP_{dur_sec}). Tendências significativas (Theil-Sen, alpha de 0,05) de aumento (+), de redução (-), ou não significativas (o) são representadas pela sequência bivariada de cores para a ΔP_{max} e ΔP_{dur_sec} ; e são representadas pelo formato do símbolo para a ΔP_{med} . O tamanho do símbolo é proporcional à distância até a estação de medição mais próxima.



A sintetização de todos os índices (Figura 24) mostra que não houve uma região hidrográfica com maior quantidade de índices de chuva com mudança significativa. Por outro lado, mudanças na vazão foram intensas por todo o país, com exceção do UR e do AS (Figura 24d). O caso mais extremo é na região hidrográfica do São Francisco, onde 75% das bacias tiveram mudanças significativas em pelo menos 5 índices, com uma mediana de 7 índices. Mudanças na vazão não foram apenas mais intensas que na chuva, como também mais numerosas. Apenas 3,7% das estações fluviométricas e 9,0% das pluviométricas não tiveram mudança em nenhum dos 11 índices. Em média, as estações de vazão tiveram mudança significativa em 4,4 índices, em comparação com 2,7 para a chuva. Os índices que mudaram mais frequentemente foram relativos às secas: vazão mínima (significativo em 62,4% das estações de medição); duração das secas hidrológicas (54,2%); chuva média entre os percentis 0 e 20 (55,8%); e duração média dos eventos sem chuva (34,7%). Os índices que menos mudaram foram geralmente relativos à sazonalidade: dia do ano com a vazão máxima (18,0%); dia do ano com vazão mínima (54,2%); centroide da chuva diária (9,9%); e chuva intensa de maior duração do ano (6,7%).

Figura 24. Número de índices com tendência significativa das estações de medição de (a) chuva e (d) vazão. Quantidade de índices com tendência significativa indicando mais água para as estações de (b) chuva e (e) vazão; e indicando menos água para (c) chuva e (f) vazão. As tendências são as mesmas das Figuras 16 a 21. A descrição dos boxplots é a mesma da Figura 16.



5 DISCUSSÃO DAS TENDÊNCIAS DE CHUVA E VAZÃO

O fato de que 80,5% das bacias tiveram mudanças significativas na vazão média, máxima, ou mínima anual reforça o conceito de bacias hidrográficas como entidades em permanente mudança (MARKONIS; KOUTSOYIANNIS, 2015; TROCH et al., 2015). Uma implicação disto é que o gerenciamento dos recursos hídricos apenas a partir de medidas estatísticas de posição (e.g., média anual) ou de dispersão (e.g., sazonalidade), sem considerar as mudanças temporais nestas estatísticas, provavelmente não representarão as reais condições da vazão.

A predominância de menos chuva e vazão na maior parte do Brasil mostra uma situação alarmante à segurança hídrica, pois o país fica mais vulnerável a eventos de seca como o do Sudeste do Brasil em 2014 e 2015 (COELHO et al., 2016). Aumentos em ambos os extremos (i.e., maiores cheias e secas), como sugerido pela intensificação do ciclo hidrológico com o aquecimento da atmosfera (TRENBERTH, 2011), foram pouco presentes. O mais próximo disto é que o aumento da vazão e chuva média anual ocorreu nas regiões que já tinham os maiores valores.

Considerando que são análises de diferentes períodos e com diferentes metodologias, os resultados apresentados não concordam com diversos outros trabalhos. Isto era o esperado, pois as tendências na literatura também pouco concordam entre si. A maior fonte de concordância com os demais trabalhos (SHEFFIELD et al., 2012; SUN et al., 2012; SPINONI et al., 2014; SOARES et al., 2017; ZILLI et al., 2017) é tendências de menos chuvas no interior do país. Comparando as tendências na chuva média com as de Rao et al. (2016), que analisaram um período semelhante (i.e., de 1979 a 2011), notam-se dois pontos importantes: (i) há concordância nas tendências de menos chuvas no Sudeste do Brasil e na parte do Cerrado próximo ao estado de GO, que foram justamente as regiões com as tendências com maior consistência espacial; e (ii) as maiores discordâncias estão nas regiões com as menores densidades de estações pluviométricas, onde Rao et al. (2016) encontraram aumentos na chuva média próximos ao estado de MT e no Semiárido. Porém, Rao et al. (2016) analisaram chuvas interpoladas e de fontes de dados que não são a ANA. Portanto, estas disparidades ressaltam a importância de analisar tendências de chuva também na escala pontual, i.e., de estações pluviométricas.

Os resultados das tendências de vazão na bacia do Amazonas e em seus tributários concordam com Villar et al. (2009) e Gloor et al. (2013), que analisaram períodos semelhantes. Há discordância nas

tendências de vazão das bacias do Tocantins-Araguaia (COSTA et al., 2003; COE et al., 2011), Paraguai (PASQUINI; DEPETRIS, 2007), e São Francisco (DETZEL et al., 2011), que analisaram períodos com mais de 20 anos de diferenças. As tendências nas bacias do alto Paraná foram substancialmente maiores que no baixo Paraná. Isto ressaltou as diferenças nos resultados com os demais trabalhos (PASQUINI; DEPETRIS, 2007; DOYLE et al., 2011), que investigaram apenas o baixo Paraná.

6 RESULTADOS DA ANÁLISE DE CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO

6.1 VAZÃO MÉDIA ANUAL

6.1.1 Descrição das variáveis

Foram investigadas cinco causas para as tendências na vazão média anual (ΔQ_{med}) das 354 bacias de menor sobreposição, definidas como variáveis independentes: (i) tendências na chuva média anual (ΔP_{med}); (ii) tendências na evapotranspiração média anual (ΔET_{med} , Figura 25a); (iii) construção de Usinas Hidrelétricas de Energia (ΔUHE , Figura 25b); (iv) demanda hídrica da bacia em 2014, i.e., volume total de água captada no ano (DMD, Figura 25c); e (v) mudança na cobertura de florestas naturais da bacia (ΔFN , Figura 25d). As duas primeiras variáveis independentes representam as forçantes hidrológicas dos fatores climáticos; e as três últimas dos fatores não climáticos.

A primeira variável, ΔP_{med} , tem distribuição espacial semelhante ao apresentado anteriormente na Figura 16a, pois os dados usados (i.e., Xavier et al., 2016) são baseadas nos dados pluviométricos da ANA. A segunda variável, ΔET_{med} , teve aumento significativo no Sul do Brasil e na região hidrográfica do SF; e redução no litoral do Nordeste do Brasil e do estado de SP (Figura 25a). Comparativamente à chuva e vazão média, as mudanças na evapotranspiração foram de menor magnitude e raramente acima de 0,40 % por ano. Considerando que a evapotranspiração média anual na maior parte das bacias é entre 800 e 1000 mm por ano (Figura F1, Apêndice F), as mudanças foram raramente maiores que 3 mm por ano. A distribuição espacial da evapotranspiração média anual das bacias está no Apêndice F. As séries temporais e as tendências de chuva e evapotranspiração média anual de cada bacia estão no Anexo H.

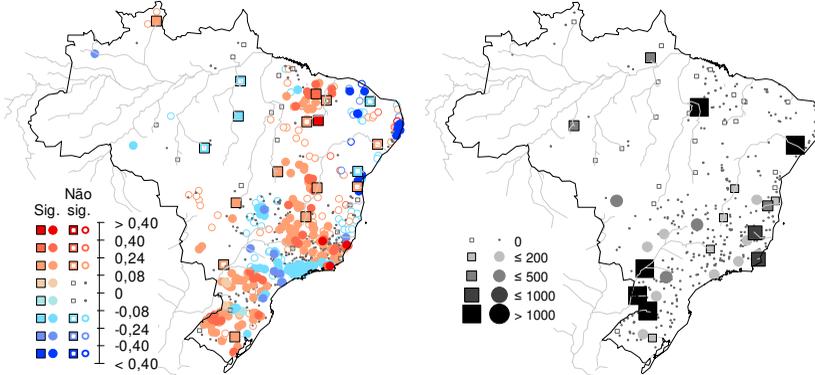
A construção de novas UHE entre 1980 e 2015 ocorreu principalmente em bacias grandes, i.e., maiores que 30 mil km² (Figura 25b). Estas se concentram no Sul e no Sudeste do Brasil. Apenas 8% das 354 bacias tiveram a construção de uma ou mais UHE. Os anos de construção de cada UHE construída até 2015 estão na Figura F2 (Apêndice F).

Demandas hídricas em 2014 proporcionais à vazão média anual foram maiores no Nordeste do Brasil, sendo frequentemente acima de 60% da vazão média anual (Figura 25c). As regiões hidrográficas do SF e do PR também tiveram altas demandas, particularmente nas áreas

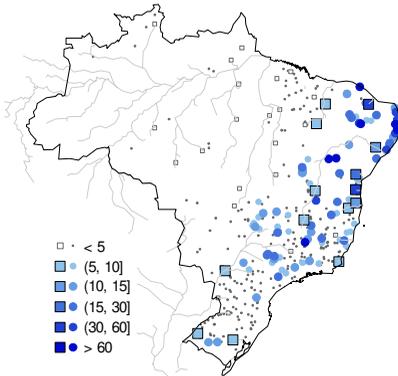
ocupadas pelo Cerrado. Se analisar demandas hídricas em volume total (i.e., em mm por ano), as maiores demandas ocorreram na região hidrográfica do PR e nas cabeceiras do SF, pois estas são as regiões com a maior ocorrência de agricultura irrigada (ANA, 2017). As demandas por microbacia e as demandas em mm por ano estão na Figura F3 (Apêndice F).

Figura 25. Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão média anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.

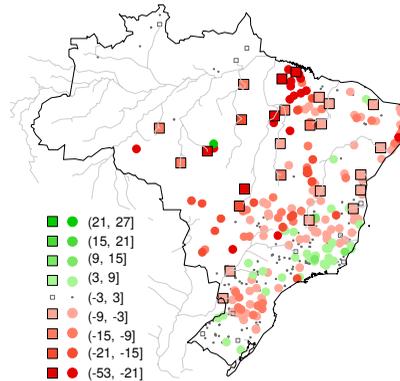
- a) Tendência na evapot. anual (% ano⁻¹) b) Geração das UHEs criadas após 1980 (MWh)



- c) Demanda hídrica em 2014 (% da vazão média anual)



- d) Mudança na cobertura de florestas naturais de 1985 a 2015 (% da área da bacia)



O desflorestamento entre 1985 e 2015 se concentrou na região do Arco de Fogo, i.e., nas proximidades da fronteira entre os biomas do Cerrado e da Amazônia (Figura 25d). Diversas bacias tiveram mudanças

na cobertura florestal em menor escala, abaixo de 9% da área da bacia. Porém, estas são de baixa confiança, porque o erro de classificação de florestas pelo MapBiomas (2018) é de cerca de 10%. Apesar destas mudanças, as bacias menos ocupadas por florestas naturais são a região hidrográfica do PR e a região dos pampas no RS (Figura F4, Apêndice F).

6.1.2 Transformação das variáveis

Antes de aplicar os dois primeiros métodos da análise de causas (i.e., correlação e regressão), todas variáveis devem se aproximar da distribuição normal a fim de cumprir as premissas de linearidade do fenômeno estudado e independência dos resíduos do modelo estatístico. A Figura 26 mostra gráficos de probabilidade com os dados antes e após a remoção de outliers, a transformação de Box-Cox, e a padronização. As variáveis ΔQ_{med} , ΔP_{med} , e ΔET_{med} não precisaram de transformação. A DMD foi transformada com o logaritmo natural:

$$DMD' = \ln(DMD) \quad (28)$$

A variável ΔUHE não foi aproximada da normal, pois 92% das bacias possuem um valor igual a zero. Por isso, a ΔUHE foi desconsiderada na regressão multivariada e foi analisada apenas nos demais métodos da análise de causas. A ΔFN foi transformada com:

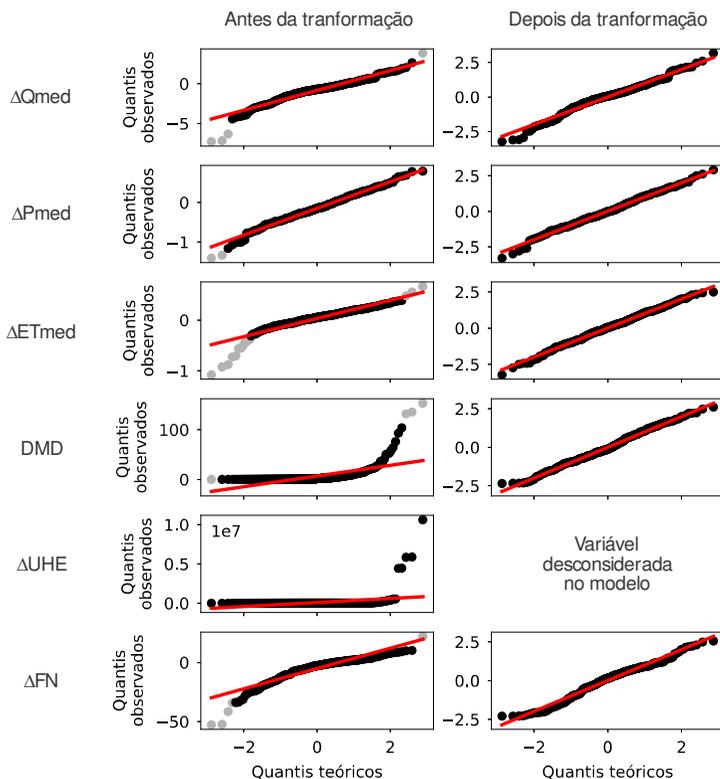
$$\Delta FN' = (\Delta FN + \min(\Delta FN))^2 \quad (29)$$

Após a transformação e remoção de outliers, todas variáveis foram padronizadas para terem uma escala em comum. As variáveis padronizadas são simbolizadas com o asterisco. Por exemplo, para a ΔFN :

$$\Delta FN^* = \frac{\Delta FN' - \overline{\Delta FN'}}{s(\Delta FN')} \quad (30)$$

onde $\overline{\Delta FN'}$ é a média de $\Delta FN'$; e $s(\Delta FN')$ é o desvio padrão de $\Delta FN'$. Com isso, todas variáveis se aproximaram da normal (Figura 26), apesar da ΔFN^* ter tido menor desempenho que as demais.

Figura 26. Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão média anual.

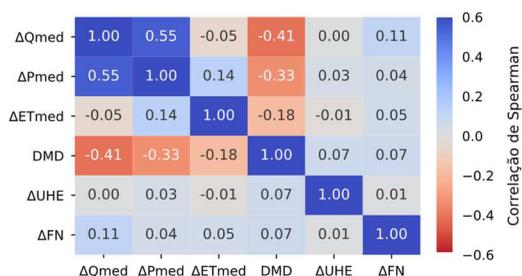


6.1.3 Correlação e regressão multivariada

As correlações entre ΔQ_{med} e as demais variáveis (Figura 27 e os gráficos de dispersão complementares no Apêndice G) sugerem que os melhores candidatos para explicar as mudanças na vazão média são ΔP_{med} e DMD. Porém, o efeito da ΔET_{med} pode estar sendo mascarado pela multicolinearidade, particularmente pela correlação de 0,14 entre ΔP_{med} e ΔET_{med} . Além disso, bacias com maiores demandas hídricas estão localizadas em regiões com tendências negativas na chuva média (correlação de -0,33). Portanto, duas opções podem estar ocorrendo: (i) a correlação de -0,41 entre ΔQ_{med} e DMD estar sendo inflada pela ΔP_{med} ; ou (ii) o oposto, a correlação de 0,55 entre ΔQ_{med} e ΔP_{med} inflada pela DMD. A primeira opção é mais

plausível, pois sugerem que bacias com redução na chuva média tiveram menor umidade do solo e maior necessidade de irrigação das culturas agrícolas, levando a maiores demandas hídricas. A segunda opção também é, apesar de controversa, onde bacias com maior demanda indicariam maior interferência antrópica e possivelmente maiores mudanças climáticas.

Figura 27. Correlações de Spearman entre as tendências na vazão média anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.



A regressão multivariada explicou 43% da variância de ΔQ_{med}^* (i.e., R^2 ajustado de 0,43) e utilizou 309 bacias após a remoção de outliers. Os resultados do modelo (Tabela 5) mostram que a regressão se deu com:

$$\Delta \hat{Q}_{med}^* = 0,42\Delta P_{med}^* - 0,17\Delta ET_{med}^* - 0,24DMD^* + 0,10\Delta FN^* \quad (31)$$

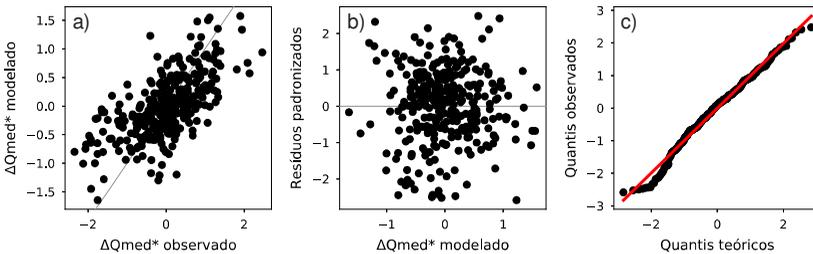
Tabela 5. Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão média anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001.

Variável	Coefficiente	Intervalo de confiança [0,025; 0,975]	P-valor	VIF
Constante	-0,003	[-0,074; 0,067]	0,927	1,00
ΔP_{med}^*	0,422	[0,344; 0,499]	< 0,001	1,17
ΔET_{med}^*	-0,168	[-0,242; -0,093]	< 0,001	1,04
DMD*	-0,242	[-0,319; -0,163]	< 0,001	1,18
ΔFN^*	0,098	[0,025; 0,170]	0,008	1,01

Os fatores de inflação da variância (VIF) mostram que os erros da ΔP_{med}^* e DMD* foram inflados, mas que a multicolinearidade

permanece em nível baixo e aceitável. Os resíduos padronizados se distribuem aleatoriamente no entorno do zero com relação à variável dependente (Figura 28b) e às variáveis independentes (Figura H1, Apêndice H). Os resíduos se aproximaram da distribuição normal (Figura 28c). Portanto, as premissas da regressão não foram violadas. Nota-se que as ΔQ_{med}^* mais baixas foram subestimadas pela regressão (Figuras 28a e 28c), cujos valores correspondem às bacias localizadas na região hidrográfica do AN.

Figura 28. Diagnóstico da regressão das tendências da vazão média anual. (a) ΔQ_{med}^* modelado em função do ΔQ_{med}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{med}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados.



A regressão sugere que as causas de mudanças na vazão média foram, em grau de importância: (i) mudanças na chuva média; (ii) demanda hídrica; e (iii) mudanças na evapotranspiração média. Apesar da demanda hídrica ter influência significativa, esta análise sugere que os fatores climáticos prevaleceram sobre os fatores não-climáticos na mudança da vazão média. Os coeficientes mostram que, somadas, a DMD^* e a ΔET_{med}^* tiveram influência semelhante à ΔP_{med}^* . Embora o coeficiente da DMD^* seja maior que o da ΔET_{med}^* , o intervalo de confiança de ambos se sobrepõe, dificultando afirmar qual delas mais influenciou ΔQ_{med}^* . O intervalo de confiança da ΔFN^* se aproxima de zero, mostrando que as influências diretas do desflorestamento na vazão média mal foram notadas.

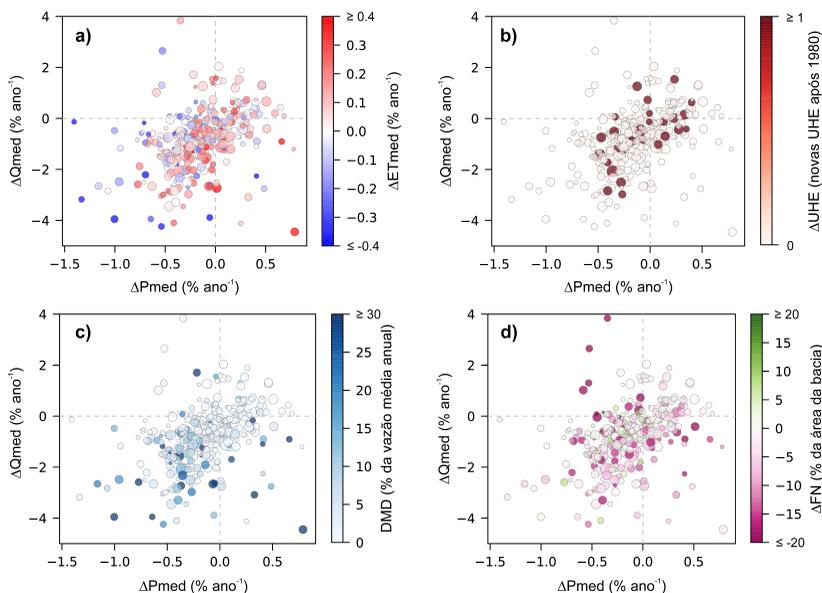
O coeficiente de 0,422 da ΔP_{med}^* significa que, caso haja mudança em 1 desvio padrão da ΔP_{med} centralizada sem haver mudança nas demais variáveis, a ΔQ_{med} centralizada terá mudança de 0,422 desvio padrão. Como o desvio padrão da ΔP_{med} centralizada é 0,31 e da ΔQ_{med} centralizada é 1,08, uma mudança de 1% na chuva média anual levou à mudança de 1,47% na vazão média anual. Para a evapotranspiração, 1% de aumento levou a 1,40% de redução na vazão

média. Apesar da semelhança nos valores da chuva e evapotranspiração, a ΔP_{med}^* foi mais influente na ΔQ_{med}^* pois as tendências na chuva média foram de maior magnitude que as tendências na evapotranspiração média.

6.1.4 Classificação de bacias

Enquanto a correlação e a regressão analisaram o comportamento médio das tendências, a classificação de bacias focou nas bacias com tendências excepcionais. Isto é, se assumir que ΔQ_{med} foi direcionado principalmente por ΔP_{med} , a classificação buscou analisar quais bacias não cumpriram esta premissa (i.e., ΔQ_{med} substancialmente diferente de ΔP_{med}) e quais das demais variáveis estiveram associadas a elas. Para isto, primeiro são visualizados gráficos de dispersão entre ΔQ_{med} e ΔP_{med} segundo as demais variáveis (Figura 29). As bacias que não

Figura 29. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão média anual (ΔQ_{med}) e na chuva média anual (ΔP_{med}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A cor do símbolo varia segundo: (a) tendência na evapotranspiração média anual; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais.



cumpriram a premissa citada estão principalmente nos quadrantes de sinais opostos entre ΔQ_{med} e ΔP_{med} . Nota-se que a construção de UHE está pouco presente nas bacias de sinais opostos, sugerindo que ΔUHE pouco interferiu nas mudanças da vazão média (Figura 29b). Bacias com aumento no ΔP_{med} e redução no ΔQ_{med} tiveram demandas hídricas altas (Figura 29c). Bacias com o oposto tiveram altas taxas de desflorestamento (Figura 29d).

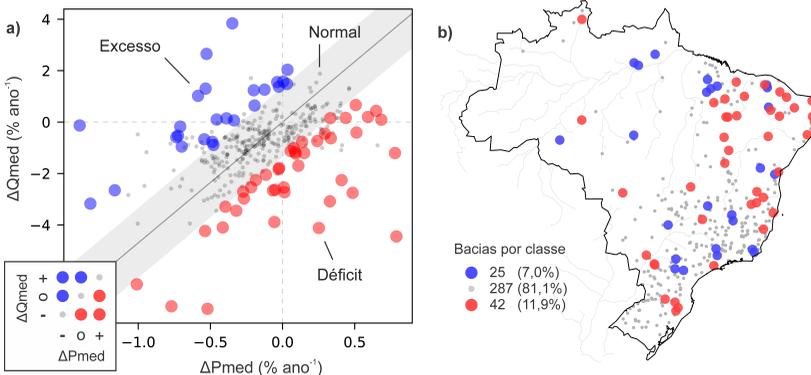
As bacias foram classificadas em três grupos quanto às suas relações entre ΔQ_{med} e ΔP_{med} (Figura 30a):

(i) Excesso hídrico: quando houve aumento significativo na ΔQ_{med} (Theil-Sen, $\alpha = 0,05$) mas não houve aumento significativo na ΔP_{med} ; ou quando o ΔQ_{med} não teve tendência significativa apesar de redução significativa na ΔP_{med} .

(ii) Normal: quando ambos ΔQ_{med} e ΔP_{med} tiveram aumento significativo, redução significativa, ou tendência não significativa.

(iii) Déficit hídrico: quando houve redução significativa na ΔQ_{med} (Theil-Sen, $\alpha = 0,05$) mas não houve redução significativa na ΔP_{med} ; ou quando o ΔQ_{med} não teve tendência significativa apesar de aumento significativo na ΔP_{med} .

Figura 30. Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{med} e ΔP_{med} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes.

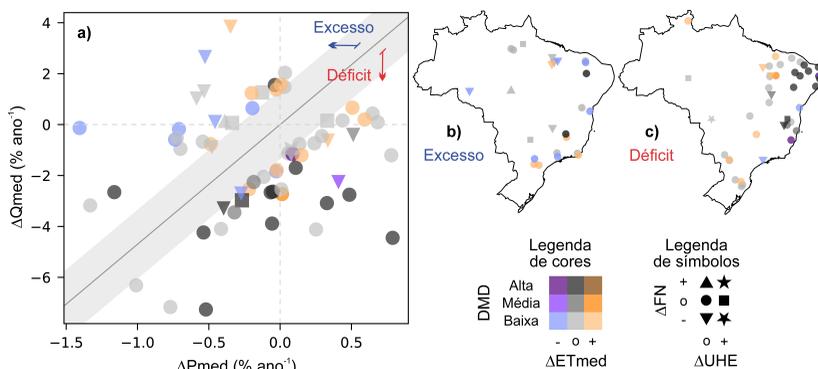


Em sobreposição a estes critérios, bacias inseridas na faixa de incerteza (trecho em cinza na Figura 30a) foram classificadas como Normal. A linha central da faixa de incerteza foi definida pela relação entre a mediana de ΔQ_{med} e de ΔP_{med} , e a faixa de incerteza com um

desvio padrão da ΔQ_{med} no entorno da linha central (i.e., $4,7 \pm 1,3 \%$ ano⁻¹).

A classificação mostra que as bacias Excesso ou Déficit estiveram distribuídas por todo o país (Figura 30b), embora as bacias Déficit foram mais numerosas e se concentraram no Nordeste. Após a classificação, foi visto quais das demais forçantes hidrológicas estiveram associadas às bacias com ΔQ_{med} e ΔP_{med} discordantes (Figura 31).

Figura 31. Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{med} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial para as bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A escala bivariada de cores representa DMD (baixas: abaixo de 10%; médias: entre 10 e 30%, altas: acima de 30%) e ΔET_{med} significativa (Theil-Sen, $\alpha = 0,05$) de aumento (+), redução (-), ou não significativa (o). Os símbolos representam ΔFN (abaixo de -20% (-), entre -20 e 20% (o), e acima de 20% (+)) e ΔUHE (construção de nova hidrelétrica (+) ou ausência de novas construções (o)).



A demanda hídrica foi a variável predominante das bacias Déficit, especialmente no Nordeste do país. 40% das bacias Déficit tiveram DMD média ou alta, contra 8% das Excesso. A ΔET_{med} teve aumento significativo em 19% das bacias Déficit e em 20% das Excesso. Portanto, a classificação de bacias reforça as evidências encontradas com a regressão, onde a DMD pode ter sido uma maior fonte de causa de mudanças na vazão média (particularmente de redução) que a ΔET_{med} . Por outro lado, as bacias Excesso não tiveram um padrão claro e foram menos explicadas por uma única variável. O número de bacias com desflorestamento substancial é semelhante em ambas classes Déficit e Excesso, concordando com os resultados da correlação e da regressão que a ΔFN foi pouco influente na ΔQ_{med} .

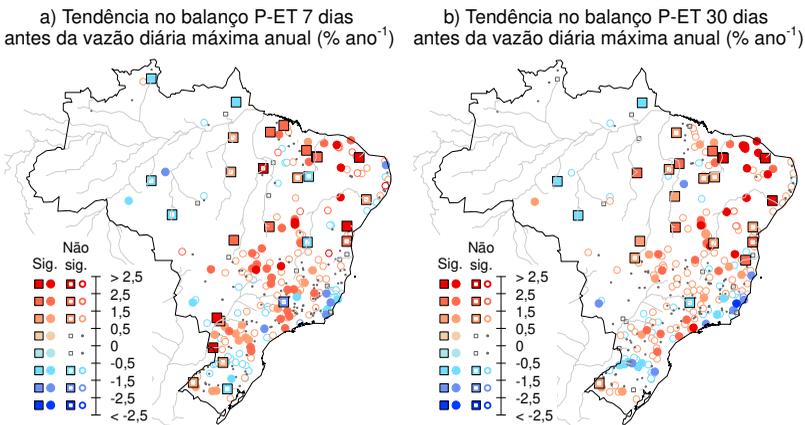
6.2 VAZÃO MÁXIMA ANUAL

6.2.1 Descrição das variáveis

Cinco variáveis independentes foram incluídas na análise de causas das mudanças na vazão máxima anual: (i) tendências no balanço de chuva e evapotranspiração cumulativas 7 dias antes do evento da vazão máxima anual ($\Delta\text{PET}_{7\text{d}}$); (ii) tendências no balanço de chuva e evapotranspiração cumulativas 30 dias antes da máxima ($\Delta\text{PET}_{30\text{d}}$); e as três mesmas forçantes hidrológicas não climáticas usadas anteriormente, sendo (iii) construção de hidrelétricas (ΔUHE), (iv) demanda hídrica (DMD), e mudança na cobertura florestal (ΔFN).

A distribuição espacial indica que a $\Delta\text{PET}_{7\text{d}}$ e a $\Delta\text{PET}_{30\text{d}}$ foram muito semelhantes (Figura 32). Ambas estão representadas em % por ano, i.e., relativas à mediana anual (Figura F5, Apêndice F). As tendências na escala de 7 dias tiveram magnitudes maiores que na escala de 30 dias. Com inspeção visual, nota-se que ambas variáveis têm distribuição espacial semelhante à $\Delta\text{Q}_{\text{max}}$.

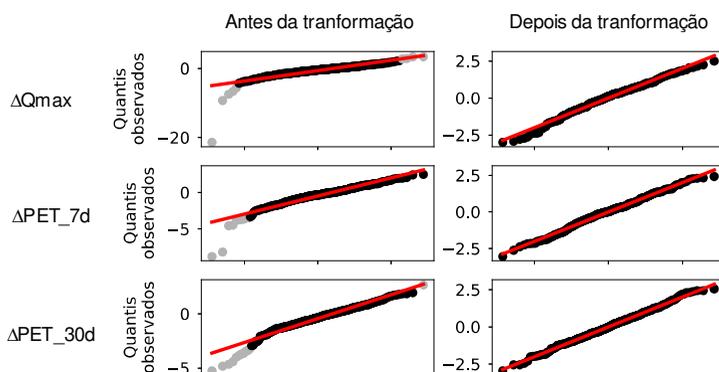
Figura 32. Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão diária máxima anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.



6.2.2 Transformação das variáveis

A transformação das variáveis ΔFN , DMD , e o descarte da ΔUHE na regressão anterior da ΔQ_{med} também foram aplicadas na regressão de ΔQ_{max} . As demais variáveis não precisaram de transformação para aproximar da distribuição normal (Figura 33). Antes de padronizar com a média e o desvio padrão, a ΔQ_{max} teve remoção de 9 outliers; ΔPET_{7d} de 11 outliers; e ΔPET_{30d} de 13 outliers.

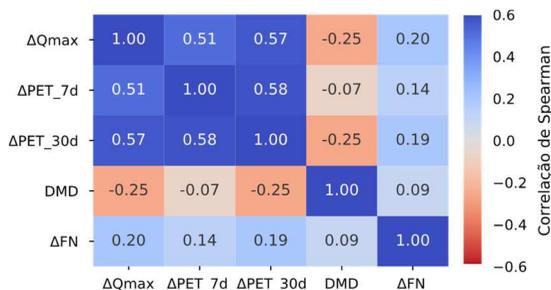
Figura 33. Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão máxima anual.



6.2.3 Correlação e regressão multivariada

As correlações sugerem que todas variáveis influenciaram mudanças na vazão máxima, com predominância dos fatores climáticos (Figura 34). Maiores interpretações são dificultadas pela multicolinearidade. A alta correlação de 0,58 entre ΔPET_{7d} e ΔPET_{30d} dificulta atribuir qual escala de tempo teve maior influência na ΔQ_{max} . Os gráficos de dispersão correspondente às correlações estão na Figura G2 (Apêndice G).

Figura 34. Correlações de Spearman entre as tendências na vazão diária máxima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.



A regressão (Tabela 6) explicou 41% da variância, utilizou 294 após a remoção de outliers, e se deu na forma:

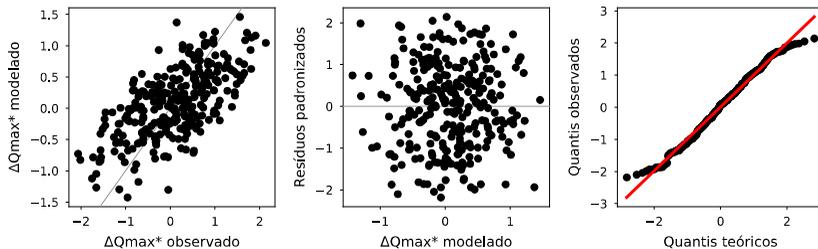
$$\Delta \hat{Q}_{max}^* = 0,06 + 0,19\Delta PET_{7d}^* + 0,35\Delta PET_{30d}^* - 0,14DMD^* + 0,08\Delta FN^* \quad (32)$$

Tabela 6. Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão diária máxima anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001.

Variável	Coefficiente	Intervalo de confiança [0,025; 0,975]	P-valor	VIF
Constante	0,060	[-0,012; 0,134]	0,102	1,00
ΔPET_{7d}^*	0,193	[0,100; 0,286]	<0,001	1,51
ΔPET_{30d}^*	0,345	[0,250; 0,440]	<0,001	1,61
DMD*	-0,140	[-0,216; -0,066]	<0,001	1,08
ΔFN^*	0,082	[0,008; 0,157]	0,030	1,06

O VIF de 1,51 e 1,61 da ΔPET_{7d} e ΔPET_{30d} significa que os resíduos destas foram infladas em 22,9% e 26,9% respectivamente. Assim, a multicolinearidade ficou em nível médio, mas aceitável. Os resíduos padronizados se distribuíram aleatoriamente em função do ΔQ_{max}^* modelado (Figura 35b) e em função das variáveis independentes (Figura H2 no Apêndice H). Os dois extremos da ΔQ_{max}^* não foram bem modelados (Figuras 35a e 35c), sugerindo que outras variáveis não incluídas na regressão direcionaram estes valores.

Figura 35. Diagnóstico da regressão das tendências da vazão diária máxima anual. (a) ΔQ_{\max}^* modelado em função do ΔQ_{\max}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{\max}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados.

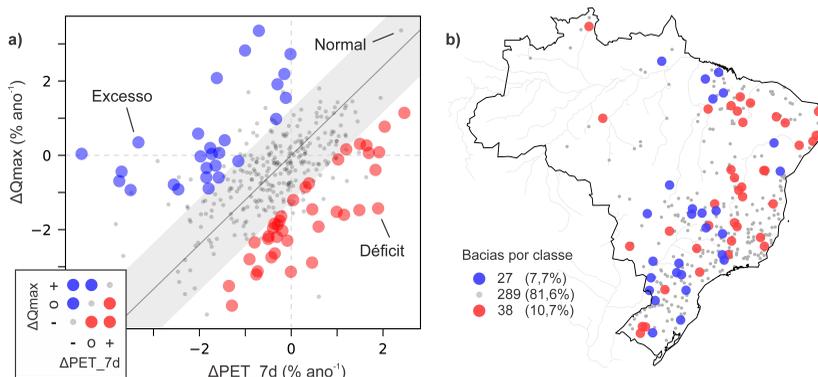


A regressão também indica que as maiores causas das mudanças na vazão máxima foram os fatores climáticos. As bacias foram melhores representadas por mudanças nos fatores climáticos na escala de tempo de 30 dias, apesar desta escala de tempo variar principalmente em função do tempo de concentração da bacia. As influências dos fatores não climáticos na ΔQ_{\max}^* foram de baixa confiança. A DMD* teve influência significativa, mas com intervalo de confiança aproximando seu coeficiente de zero. De fato, redução significativa na vazão máxima poderia ser causada por altas demandas hídricas, mas aumento significativo na vazão máxima causada por baixas demandas hídricas não é plausível. Com relação à cobertura florestal, o p-valor de 0,03 do coeficiente de ΔFN^* é alto se considerar o número de amostras do modelo, o que não sugere a ΔFN como causa da ΔQ_{\max} segundo a regressão.

6.2.4 Classificação de bacias

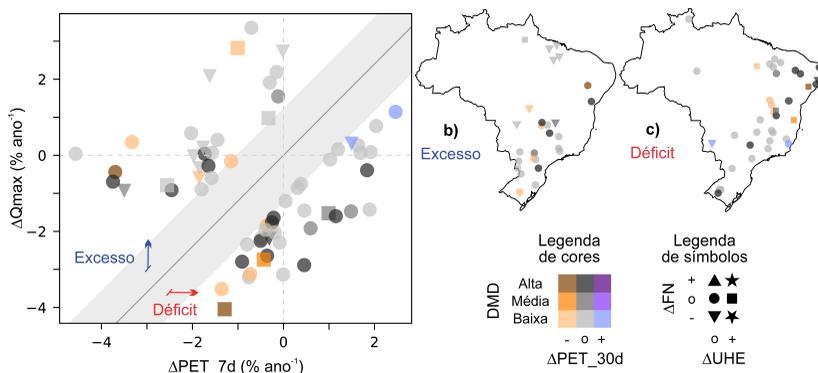
As classificações das bacias em Excesso, Normal, e Déficit para as máximas foi feita considerando ΔQ_{\max} em função de ΔPET_{7d} (Figura 36a). As bacias com ΔQ_{\max} não explicadas por ΔPET_{7d} da classe Déficit estiveram concentradas no Nordeste do Brasil (Figura 36b). As bacias Excesso foram mais presentes na região hidrográfica do PR, onde houve ΔQ_{\max} não significativa apesar de ΔPET_{7d} com redução significativa. Gráficos de dispersão entre ΔQ_{\max} e ΔPET_{7d} em função das demais variáveis estão na Figura I1 (Apêndice I).

Figura 36. Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{max} e ΔPET_{7d} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes.



As bacias Excesso foram mais associadas ao desflorestamento (i.e., 26% das 27 bacias) que as bacias Déficit (5% das 38 bacias) (Figura 37). O mais notável é que a principal característica em comum de todas as bacias da região hidrográfica do PR é a menor taxa do país de cobertura de florestas naturais (Figura F4, Apêndice F). Como as bacias Excesso foram mais presentes na bacia do PR, formam-se evidências de que a cobertura da terra possa ter influenciado significativamente as mudanças de vazão máxima no Brasil. Porém, estas evidências permanecem fracas, uma vez que (i) a maior parte das bacias do PR não

Figura 37. Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{max} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial das bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A descrição da legenda de cores e símbolos é a mesma da Figura 31.



estão classificadas como Excesso, e (ii) a maior parte (i.e., 74%) das bacias Excesso não estão associadas ao desflorestamento.

6.3 VAZÃO MÍNIMA ANUAL

6.3.1 Variáveis

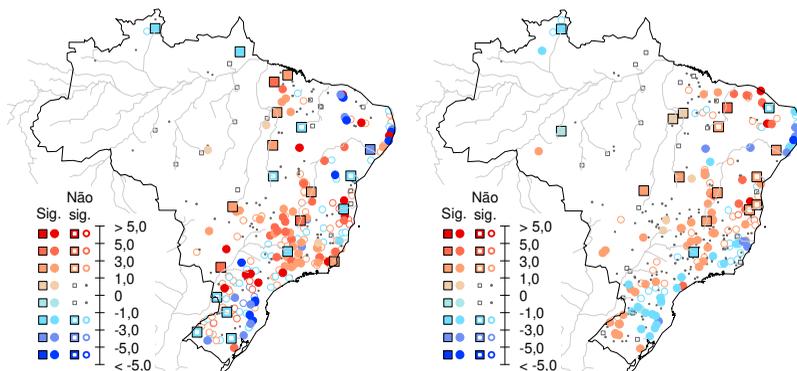
Mudanças na vazão mínima anual de 7 dias foram comparadas com as variáveis independentes: tendências no balanço de chuva e evapotranspiração cumulativas de (i) 90 dias antes do evento da mínima ($\Delta\text{PET}_{90\text{d}}$) e (ii) 365 dias antes do evento da mínima ($\Delta\text{PET}_{365\text{d}}$); construção de hidrelétricas (ΔUHE); demandas hídricas (DMD); e mudança na cobertura de florestas naturais (ΔFN).

Com inspeção visual, nota-se que $\Delta\text{PET}_{90\text{d}}$, $\Delta\text{PET}_{365\text{d}}$, e ΔQmin não foram tão relacionadas entre si quanto no caso anterior da ΔQmax . Grande parte do Cerrado e do AN teve uma alarmante redução na vazão mínima, mas o mesmo não foi observado nas forçantes hidrológicas dos fatores climáticos.

Figura 38. Espacialização dos índices das forçantes hidrológicas da análise de causas das tendências na vazão mínima anual da média móvel de 7 dias. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.

a) Tendência no balanço P-ET 90 dias antes da vazão mínima anual de 7 dias (% ano⁻¹)

b) Tendência no balanço P-ET 365 dias antes da vazão mínima anual de 7 dias(% ano⁻¹)

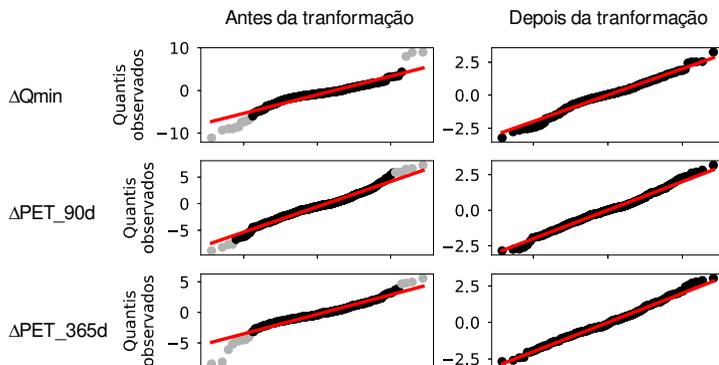


6.3.2 Transformação das variáveis

Além da DMD, ΔFN , e ΔUHE , as três demais variáveis não precisaram de transformação para aproximar da distribuição normal

(Figura 39). Antes da padronização dos dados, foram descartados 16 outliers da ΔQ_{\min} , 10 da ΔPET_{90d} , e 15 da ΔPET_{365d} .

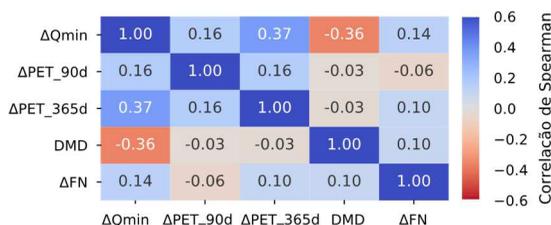
Figura 39. Gráficos de probabilidades da distribuição normal antes e após a transformação, a remoção de outliers, e a padronização dos índices da análise de causas das tendências da vazão mínima anual.



6.3.3 Correlação e regressão multivariada

Houve correlação significativa de $-0,36$ entre ΔQ_{\min} e DMD, sem haver alta correlação entre DMD e as demais variáveis. Portanto, as correlações sugerem a demanda hídrica como a melhor candidata para explicar mudanças na vazão mínima. A correlação entre ΔQ_{\min} e ΔPET_{365d} também sugere esta como uma potencial candidata, apesar da multicolinearidade. Os gráficos de dispersão das variáveis estão na Figura G3 (Apêndice G).

Figura 40. Correlações de Spearman entre as tendências na vazão mínima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.



A regressão (Tabela 7) explicou apenas 28% da variância de ΔQ_{\min}^* . Ainda assim, foi significativa com p-valor < 0,001. Foram usadas 287 bacias. A regressão se deu com:

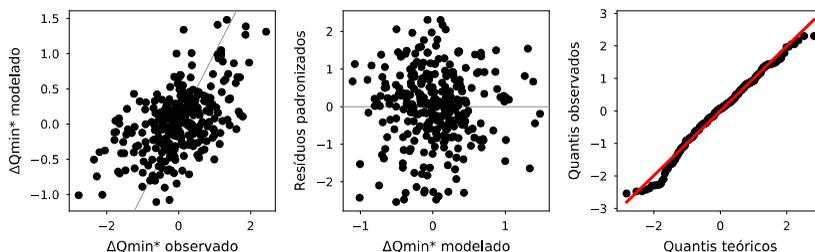
$$\widehat{\Delta Q}_{\min}^* = 0,02 + 0,10\Delta PET_{90d}^* + 0,28\Delta PET_{365d}^* - 0,32DMD^* + 0,10\Delta FN^* \quad (33)$$

Tabela 7. Resultados da regressão multivariada das tendências na vazão mínima anual (variável dependente) a partir dos índices das suas forçantes hidrológicas (variáveis independentes). VIF significa fator de inflação da variância. A regressão foi significativa para o nível de 0,001.

Variável	Coefficiente	Intervalo de confiança [0,025; 0,975]	P-valor	VIF
Constante	0,024	[-0,061; 0,108]	0,585	1,00
ΔPET_{90d}^*	0,100	[0,012; 0,188]	0,025	1,04
ΔPET_{365d}^*	0,277	[0,188; 0,366]	<0,001	1,05
DMD*	-0,317	[-0,401; -0,232]	<0,001	1,01
ΔFN^*	0,096	[0,008; 0,183]	0,008	1,03

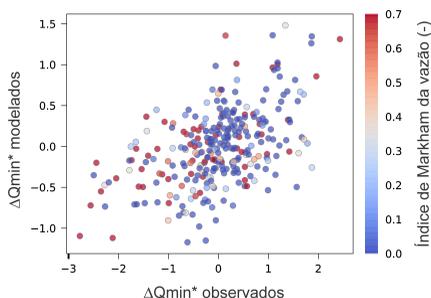
Os resíduos padronizados em função da ΔQ_{\min}^* modelada não tiveram distribuição aleatória (Figura 41 b). Os resíduos mostram heteroscedasticidade, possível não linearidade do fenômeno, e possível dependência com alguma característica das bacias hidrográficas. Bacias com alta sazonalidade têm as secas dependente da estação úmida anterior. A Figura 42 mostra que os resíduos da regressão foram, de fato, dependentes da sazonalidade da vazão. Por isso, há a possibilidade de bacias de alta e baixa sazonalidade terem tido respostas significativamente diferentes às forçantes hidrológicas da ΔQ_{\min} .

Figura 41. Diagnóstico da regressão das tendências da vazão mínima anual. (a) ΔQ_{\min}^* modelado em função do ΔQ_{\min}^* observado. (b) Resíduos padronizados da regressão em função do ΔQ_{\min}^* modelado. (c) Gráfico de probabilidades da distribuição normal dos resíduos padronizados.



Embora não tenha sido aplicado neste trabalho, a modelagem de ΔQ_{\min} para bacias de alta e baixa sazonalidade separadamente pode trazer melhores resultados.

Figura 42. ΔQ_{\min}^* modelado em função do ΔQ_{\min}^* observado. A cor do símbolo indica a mediana da série anual de sazonalidade da vazão média da bacia.

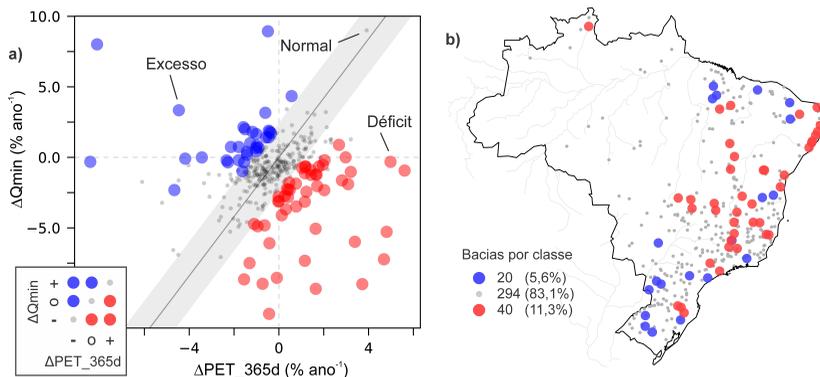


Mesmo com o menor desempenho da regressão, esta forma mais uma evidência de que a demanda hídrica seja, juntamente com ΔPET_{365d} , a causa predominante de mudanças na vazão mínima. Porém, a demanda hídrica explicaria apenas tendências em uma direção, i.e., de redução na vazão mínima. O baixo coeficiente de ΔPET_{90d}^* e seu alto p-valor mostram que, contraintuitivamente, esta variável pouco direcionou ΔQ_{\min}^* . E, novamente, a influência da ΔFN^* na ΔQ_{\min}^* é pequena comparada às demais variáveis.

6.3.4 Classificação de bacias

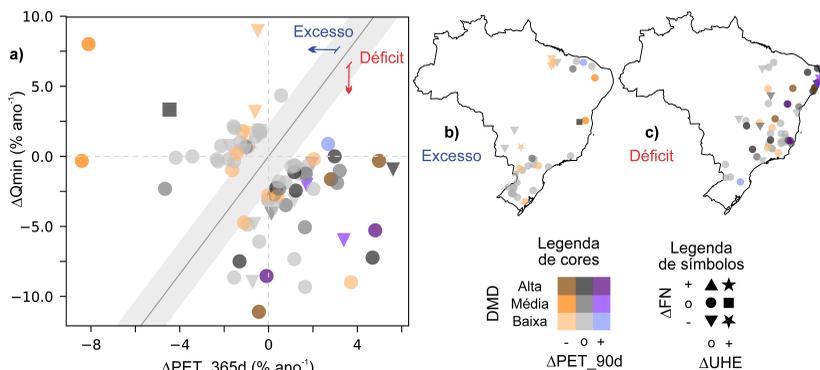
A classificação das bacias assumiu a premissa de ΔQ_{\min} direcionada por ΔPET_{365d} (Figura 43). Houve o dobro de bacias Déficit que Excesso. A maior parte das bacias Déficit estão em partes do Cerrado, na bacia do SF, e na região hidrográfica do AL. Os gráficos de dispersão da ΔQ_{\min} e ΔPET_{365d} em função das demais não trazem padrões claros (Figura I2, Apêndice I), além de mostrar que a ΔUHE pouco interferiu na relação entre ambas variáveis.

Figura 43. Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit a partir de ΔQ_{\min} e ΔPET_{365d} . (a) Gráfico de dispersão e (b) distribuição espacial das classes.



A demanda hídrica foi a variável mais presente nas bacias Déficit: 45% das 40 bacias possuem DMD médias ou altas (Figura 44). Para a classe Excesso, foram 25% das 20 bacias. Portanto, somam-se as evidências que forçantes hidrológicas climáticas e não climáticas tiveram pesos semelhantes nas causas das mudanças na vazão mínima. Dentre todos os índices analisados, as tendências na vazão mínima foram as mais frequentes (significativas em 62,4% das 779 estações de medição), as mais alarmantes e, dentre todas as análises de causas, foram também as de maior influência antrópica.

Figura 44. Forçantes hidrológicas associadas às bacias Excesso e Déficit de ΔQ_{\min} . (a) Gráfico de dispersão. Distribuição espacial das bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A descrição da legenda de cores e símbolos é a mesma da Figura 31.



7 DISCUSSÃO DAS CAUSAS DAS TENDÊNCIAS DE VAZÃO

A influência significativa da demanda hídrica da bacia nas mudanças de vazão não é ao todo problemática à sociedade e à utilização dos recursos hídricos. Por exemplo, no Semiárido, a captação e o armazenamento de água com o Programa Um Milhão de Cisternas reduziram drasticamente a escassez hídrica para uso socioeconômico (BRITO et al., 2007). Porém, 75% da demanda hídrica do país é devido à irrigação, 9% à dessedentação animal, e apenas 10% ao abastecimento humano (ANA, 2016). Portanto, para que haja uma eficiente adaptação a mudanças nos recursos hídricos, a irrigação deverá ser bem planejada e monitorada. Suas consequências nos recursos hídricos devem ser claras, para que não levem a processos como (i) secas hidrológicas induzidas pela irrigação, por consequência, (ii) menos água disponível para irrigar, levando a (iii) menor produtividade agrícola e (iv) a necessidade de expansão territorial da agricultura para contrabalancear a baixa produtividade, retornando à etapa (i) como um ciclo.

As fracas evidências encontradas dos efeitos das mudanças da cobertura florestal nas tendências de vazão não significam que esta variável não levou a mudanças hidrológicas. Neste trabalho há diversas limitações nesta análise. Primeiro, foram analisadas apenas influências diretas das mudanças da cobertura florestal na vazão. Os efeitos indiretos podem ser maiores que os efeitos diretos, pois o desflorestamento pode alterar substancialmente a fisiografia da bacia (BRUIJNZEEL, 2004) e aumentar a sensibilidade às mudanças na chuva (CHAGAS; CHAFFE, 2018). Segundo, o desflorestamento pode ter consequências opostas na vazão. Por exemplo, o desflorestamento pode aumentar a vazão mínima (ANDRÉASSIAN, 2004) ou diminuí-la (BRUIJNZEEL, 2004), dependendo das características do solo e das mudanças na infiltração. Como foi investigado o efeito médio das mudanças florestais na vazão no Brasil, estes efeitos opostos podem ter interferido na análise. Terceiro, as mudanças na vazão dependem também de qual cobertura da terra substituiu ou foi substituída por florestas, como culturas anuais, culturas permanentes, pastagens com ou sem taludes, entre outros (BRUIJNZEEL, 2004). Quarto, o desflorestamento pode ter sido não-linear no tempo, isto é, pode ter ocorrido no começo da série temporal (e.g. entre 1985 e 1990) ou no final (e.g. 2010 a 2015). Como foram avaliados apenas as coberturas da terra em 1985 e em 2015, não foi considerado a época em ocorreram as mudanças nos usos da terra. Os trabalhos que encontraram evidências de que o desflorestamento levou ao aumento da vazão média na bacia do

Tocantins (COSTA et al., 2003), Paraguai (COLLISCHONN et al., 2001), e Paraná (DOYLE et al., 2011) investigaram intensivamente um pequeno grupo de bacias, o que suprime as limitações citadas.

Outra limitação deste trabalho é inerente à hipótese formulada de que mudanças na vazão anual entre 1980 e 2015 podem ter sido causadas por uma ou mais das cinco forçantes hidrológicas analisadas. As consequências destas forçantes hidrológicas na vazão variam segundo escalas temporais e espaciais (MERZ et al., 2012). Por exemplo, a construção de hidrelétricas pode levar a mudanças abruptas na vazão, agindo como um salto na série. Por outro lado, o efeito das mudanças na cobertura da terra podem ser graduais, de baixa intensidade, e se estenderem por décadas ou séculos. Mudanças na cobertura da terra são mais perceptíveis em menores escalas espaciais, enquanto mudanças de fatores climáticos podem ocorrer também em largas escalas (BLÖSCHL et al., 2007). Somado a isto tudo, a não inclusão de variáveis das características físicas das bacias na análise de causas pode alterar substancialmente os resultados obtidos. Características do solo, por exemplo, podem ter influência significativa ao servir como mediador da sensibilidade das bacias às forçantes hidrológicas.

Limitações metodológicas incluem a substituição do tempo pelo espaço para explicar as séries temporais da vazão. A maior desvantagem desta substituição é a inclusão de bacias hidrográficas com diferentes fisiografias. Portanto, a análise de causas não foi feita com amostras sob condições controladas. Além disto, limitações inerentes aos dados usados estiveram presentes por todo o trabalho. Incertezas são observadas na estimativa da vazão com a curva-chave, na interpolação espacial da chuva, e na modelagem da evapotranspiração. Sobreposto a isso, as tendências de Theil-Sen calculadas possuem uma grande faixa de incerteza. Esta faixa não é considerada na regressão, então outros métodos que a considere podem ser mais adequados na análise de causas. A limitação dos dados de demanda hídrica é que não se tratam de uma série temporal, como os demais índices. E, relativo aos empreendimentos hidrelétricos, a não inclusão dos mais de mil pequenos empreendimentos, a ausência do volume total de armazenamento de cada UHE, e a ausência da operação dos reservatórios podem ter deixado de revelar maiores influências antrópicas nas tendências de vazão.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou tendências no regime de chuvas no Brasil; no regime de vazão; e o que causou as mudanças na vazão média, máxima, e mínima anual. Foram analisadas tendências de 1980 a 2015 em doze índices de chuva e doze de vazão. Um total de 2323 estações de medição de chuva e 779 de vazão foram consideradas. A hipótese investigada é que as mudanças na vazão foram causadas por mudanças na chuva, na evapotranspiração, na cobertura de florestas, construção de reservatórios, e captação de água pela sociedade.

8.1 TENDÊNCIAS NO REGIME DE CHUVAS

59% das estações pluviométricas analisadas tiveram tendência significativa na chuva média anual, na chuva diária máxima, ou na duração média do intervalo entre chuvas. Os índices com tendências mais frequentes foram a chuva média entre os percentis 0 e 20, significativo para 55,8% das estações; e na duração média dos eventos sem chuva, significativo para 34,7%. Houve alta heterogeneidade espacial das tendências de chuva, embora a maior parte do país tenha predominância de menos chuvas. As regiões hidrográficas do Atlântico Leste, bacia do Paraná, bacia do São Francisco e do Tocantins tiveram aumento significativo no intervalo entre chuvas em mais de 75% das estações de medição. As mudanças na chuva com maior consistência espacial foram no Sudeste do Brasil e na região do Cerrado próximo ao estado de Goiás, onde predominou menores chuvas médias e maiores intervalos entre chuvas. O aumento na chuva média ocorreu nas regiões com as maiores chuvas médias anuais, i.e., no Sul do Brasil e em parte da Amazônia. Mudanças na sazonalidade da chuva média ocorreram por todo o país, mas não tiveram sinal predominante. Mudanças nas chuvas intensas foram pouco conclusivas devido à baixa concordância espacial.

8.2 TENDÊNCIAS NO REGIME DE VAZÃO

Mudanças na vazão foram mais frequentes e mais intensas que na chuva. A não-estacionariedade das séries de vazão foi quatro vezes mais frequente que a estacionariedade: 80,5% das estações fluviométricas tiveram tendência significativa na vazão média, máxima, ou mínima anual. As tendências mais frequentes foram na vazão mínima anual, significativo em 62,4% das estações; e na duração das secas hidrológicas, significativo em 54,2%. As menores mudanças foram

relativas à sazonalidade. Houve predominância de menos vazão no Brasil. Reduções na vazão média, máxima, e mínima anual predominaram por todo o Cerrado e o Semiárido. Mudanças alarmantes ocorreram nas regiões hidrográficas do Atlântico Norte, bacia do Tocantins, bacia do alto Paraná, e principalmente na bacia do São Francisco, onde suas sub-bacias tiveram tendência significativa mediana em 7 dos 12 índices analisados. 48,8% das bacias analisadas tiveram redução significativa na vazão mínima anual. 9,6% das bacias passaram a ter vazão virtualmente igual a zero na estação seca do ano. Aumentos na vazão média e máxima anual ocorreram nas partes norte e oeste da Amazônia; e na região da fronteira entre os estados de MG, ES, e RJ. A autocorrelação da vazão diária aumentou significativamente ao longo da costa brasileira.

8.3 CAUSAS DAS TENDÊNCIAS NA VAZÃO MÉDIA, MÁXIMA, E MÍNIMA ANUAL

As variáveis que causaram as mudanças na vazão média foram, em grau de importância: (i) mudanças na chuva média; (ii) demanda hídrica da bacia; e (iii) mudanças na evapotranspiração média. As causas dos fatores climáticos predominaram sobre as causas não climáticas. Somadas, a demanda hídrica e a evapotranspiração tiveram influência semelhante à chuva. Bacias com mudança na vazão média abaixo do sugerido pelas mudanças na chuva média foram mais numerosas no Nordeste do país, sendo associadas a altas demandas hídricas. Não foram encontradas evidências de que hidrelétricas e mudanças na cobertura de florestas naturais tenham causado mudanças na vazão média.

Mudanças na vazão máxima anual foram melhor explicadas pelos fatores climáticos. Em particular, pelas tendências no balanço de chuva e evapotranspiração 30 dias antes do evento da vazão máxima. Foram encontradas fracas evidências de que o desflorestamento tenha contribuído com o aumento de vazões máximas. As bacias com mudanças na vazão máxima acima do sugerido por fatores climáticos ocorreram no alto da bacia do Paraná, que é a região do país com menor cobertura florestal; ou estiveram associadas principalmente ao desflorestamento.

As tendências na vazão mínima foram menos explicadas pelas variáveis analisadas que nas vazões médias e máximas. A demanda hídrica teve o mesmo peso nas mudanças da vazão mínima que os fatores climáticos. A variável climática de maior influência foi o

balanço de chuva e evapotranspiração um ano antes do evento da vazão mínima, sugerindo que as secas têm maior relação com a estação úmida do ano que a antecedeu. Bacias com mudança na vazão mínima abaixo do explicado por fatores climáticos foram mais numerosas em partes do Cerrado, da bacia do São Francisco, e da região hidrográfica do Atlântico Leste. Estas estiveram associadas a grandes demandas hídricas. A vazão mínima, além de ter sido o índice com mudanças mais frequentes, foi também o de maior influência antrópica.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada. Brasília: ANA, 2017. 85 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. 2018. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 15 jan. 2018.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Metadados da Agência Nacional de Águas, Demandas Hídricas Consuntivas. 2016. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em 15 de novembro de 2018.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 291, n. 1–2, p. 1–27, 2004.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n. 673, de 4 de agosto de 2015: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. SIGEL – Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico. 2018. Disponível em: < <http://sigel.aneel.gov.br/>>. Acesso em 15 fev. 2018.

ARCHFIELD, S. A.; HIRSCH, R. M.; VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. Fragmented patterns of flood change across the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 19, p. 10,232-10,239, 2016.

BAKER, D. B.; RICHARDS, R. P.; LOFTUS, T. T.; KRAMER, J. W. A New Flashiness Index: Characteristics and Applications To Midwestern Rivers and Streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 2, p. 503–522, 2004.

BARCO, J.; GUNAWAN, S.; HOGUE, T. S. Seasonal controls on stream chemical export across diverse coastal watersheds in the USA. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 27, n. 10, p. 1440–1453, 2013.

BARROS, V. R.; DOYLE, M. E.; CAMILLONI, I. A. Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases

and with low-level circulation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 1–2, p. 19–33, 2008.

BERBERY, E. H.; BARROS, V. R. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 3, p. 630–645, 2002

BLÖSCHL, G.; ARDOIN-BARDIN, S.; BONELL, M.; et al. At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1241–1247, 2007.

BLÖSCHL, G.; GAÁL, L.; HALL, J.; et al. Increasing river floods: fiction or reality? **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 329–344, 2015.

BLÖSCHL, G.; HALL, J.; PARAJKA, J.; et al. Changing climate shifts timing of European floods. **Science**, v. 357, n. 6351, p. 588–590, 2017.

BRITO, LT de L.; DE MOURA, M. S. B.; GAMA, G. F. B. **Potencialidades da água de chuva no Semi-árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007.

BROXTON, P. D.; ZENG, X.; SULLA-MENASHE, D.; TROCH, P. A. A global land cover climatology using MODIS data. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 6, p. 1593–1605, 2014.

BRUIJNZEEL, L. A., BONELL, M., GILMOUR, D. A.; LAMB, D. Conclusion: Forests, water and people in the humid tropics: an emerging view. In M. BONELL, L. A. BRUIJNZEEL (Org.). *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management* New York, EUA: Cambridge University Press, 2005, pag. 906–925.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 104, p. 185–228, 2004.

BUDYKO, Mikhail Ivanovich. *Climate and life*. 1971.

BYUN, H. R.; WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, v. 12, n. 9, p. 2747–2756, 1999.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; SILVA, A. E.; LIEBMANN, B.; DIAS, P. L. S. **The South Monsoon System and the 1970s climate transition. International Journal of Climatology**, v. 31, p. 1248-1256, 2011.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. The Role of Land Cover in the Propagation of Rainfall into Streamflow Trends. **Water Resources Research**, v. 54, p. 5986–6004, 2018.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. EUA: McGraw Hill, 1988. 588 p.

CLAUSEN, B.; BIGGS, B. J. F. Flow variables for ecological studies in temperate streams: Groupings based on covariance. **Journal of Hydrology**, v. 237, n. 3–4, p. 184–197, 2000.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1, p. 119–131, 2011.

COELHO, Caio AS 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.

COLE, R. A. J.; JOHNSTON, H. T.; ROBINSON, D. J. The use of flow duration curves as a data quality tool. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 6, p. 939–952, 2003.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: Part of a wider phenomenon of climate change? **Journal of Hydrology**, v. 245, n. 1–4, p. 218–238, 2001.

COSTA, M. H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L. A. (Org.) *Forests, Water, and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future*

Hydrological Research for Integrated Land and Water Management. New York, EUA: Cambridge University Press, 2005, cap 23, p 590-597.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1–4, p. 206–217, 2003.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 2010.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Hidrogeológico do Brasil**. 2014. Mapa, escala: 1:5.000.000. Programa Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo.

DAI, A.; QIAN, T.; TRENBERTH, K. E.; MILLIMAN, J. D. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. **Journal of Climate**, v. 22, n. 10, p. 2773–2792, 2009.

DETZEL, D. H. M.; BESSA, M. R.; VALLEJOS, C. A. V.; SANTOS, A. B.; THOMSEN, L. S. Estacionariedade das Afluências às Usinas Hidrelétricas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 3, p. 95–111, 2011.

DIAS, L. C. P.; PIMENTA, F. M.; SANTOS, A. B.; COSTA, M. H.; LADLE, R. J. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global change biology**, v. 22, n. 8, p. 2887–2903, 2016.

DONAT, M. G.; ALEXANDER, L. V.; YANG, H.; et al. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 7, p. 997–1006, 2013.

DONAT, M. G.; LOWRY, A. L.; ALEXANDER, L. V.; O’GORMAN, P. A.; MAHER, N. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 5, p. 508–513, 2016.

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. **International Journal of Climatology**, v. 31, p. 2234-2248, 2011.

DOYLE, M. E.; SAURRAL, R. I.; BARROS, V. R. Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 14, p. 2149–2162, 2012.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. An introduction to the bootstrap. CRC press, 1994.

ELLISON, D.; FUTTER, M. N.; BISHOP, K. On the forest cover-water yield debate: From demand- to supply-side thinking. **Global Change Biology**, v. 18, n. 3, p. 806–820, 2012.

EUSER, T. et al. A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 5, p. 1893-1912, 2013.

FENG, H.; ZHANG, M. Global land moisture trends: drier in dry and wetter in wet over land. **Scientific Reports**, v. 5, n. December, p. 18018, 2015.

FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Changes in rainfall seasonality in the tropics. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 9, p. 811–815, 2013.

FERNANDES, R. P.; SILVA, R. W. DA C.; SALEMI, L. F.; et al. The influence of sugarcane crop development on rainfall interception losses. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 532–539, 2017.

FLEIG, A. K.; TALLAKSEN, L. M.; HISDAL, H.; DEMUTH, S. A global evaluation of streamflow drought characteristics. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 2, n. 6, p. 2427–2464, 2005.

GARCIA, N. O.; MECHOSO, C. R. Variability in the discharge of South American rivers and in climate. **Hydrological Sciences**, v. 50, n. 3, p. 459–478, 2005.

GERTEN, D.; ROST, S.; VON BLOH, W.; LUCHT, W. Causes of change in 20th century global river discharge. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, p. 1–5, 2007.

GLOOR, M.; BRIENEN, R. J. W.; GALBRAITH, D.; et al. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 9, p. 1729–1733, 2013.

GREVE, P.; ORLOWSKY, B.; MUELLER, B.; et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. **Nature Geoscience**, v. 7, n. 10, p. 716–721, 2014.

GRIMALDI, S. et al. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, v. 57, n. 2, p. 217–228, 2012.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, p. 537–554, 2011.

HAIR, J. F. et al. *Multivariate data analysis*. New Jersey, 2014.

HALL, J. et al. Understanding flood regime changes in Europe: A state of the art assessment. **Hydrology and earth system sciences**, v. 18, n. 7, p. 2735–2772, 2014.

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

HAYLOCK, M.; NICHOLLS, N. Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910–1998. **International Journal of Climatology**, v. 20, n. 13, p. 1533–1541, 2000.

HENSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. *Statistical Methods in Water Resources*. USGS, 2002. 510 p.

HIRSCH, R. M. A Perspective on nonstationarity and water management. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 47, n. 3, p. 436–446, 2011.

HORNBERGER, G. M.; WIBERG, P. L.; RAFFENSPERGER, J. P.; D'ODORICO, P. Elements of Physical Hydrology. 2.ed. Baltimore, EUA: John Hopkins University Press, 2014. 378 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE - Mapas. 2015. Disponível em: < <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html> >. Acesso em: 15 jul. 2015.

JACQUES-COPER, M. J.; GARREAUD, R. D. Characterization of the 1970s climate shift in South America. **International Journal of Climatology**, v. 35, p. 2164-2179, 2015.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162–178, 2014.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.

KREPPER, C. M.; GARCÍA, N. O.; JONES, P. D. Interannual variability in the Uruguay river basin. **International Journal of Climatology**, v. 23, p. 103-115, 2003.

KRISHNAMURTHY, C. K. B.; LALL, U.; KWON, H. H. Changing frequency and intensity of rainfall extremes over India from 1951 to 2003. **Journal of Climate**, v. 22, n. 18, p. 4737–4746, 2009.

KUNDZEWICZ, Z. W.; GERTEN, D. Grand Challenges Related to the Assessment of Climate Change Impacts on Freshwater Resources. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, p. 1–10, 2014.

KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS, N.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; E OUTROS. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, n. 1, p. 1-28, 2013.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A J. Change detection in hydrological records - a review of the methodology. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 1, p. 7–19, 2004.

LI, D.; LONG, D.; ZHAO, J.; LU, H.; HONG, Y. Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 217–232, 2017.

LIU, Wenbin et al. A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 82-95, 2016.

LIEBMANN, B.; ALLURED, D. Daily precipitation grids for South America. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 11, p. 1567-1570, 2005.

LIEBMANN, B.; VERA, C. S.; CARVALHO, L. M. V; et al. An observed trend in central South American precipitation. **Journal of Climate**, v. 17, n. 22, p. 4357–4367, 2004.

MACIEL, F.; DÍAZ, A.; TERRA, R. Multi-annual variability of streamflow in La Plata Basin. Part I: Observations and links to global climate. **International Journal of River Basin Management**, v. 11, n. 4, p. 345–360, 2013.

MALLAKPOUR, I.; VILLARINI, G. Investigating the relationship between the frequency of flooding over the central United States and large-scale climate. **Advances in Water Resources**, v. 92, p. 159–171, 2016.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 3 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 15 de novembro de 2018 através do link: <http://mapbiomas.org/>.

MARENGO, J. A. Variations and change in south American streamflow. **Climatic Change**, v. 31, n. 1, p. 99–117, 1995.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; KOUSKY, V. E.; FILIZOLA, N. P.; WAINER, I. C. Onset and End of the Rainy Season in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 833–852, 2001.

MARKHAM, C. G. Seasonality of Precipitation in the United States. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 60, n. 3, p. 593–597, 1970.

MARKONIS, Y.; KOUTSOYIANNIS, D. Scale-dependence of persistence in precipitation records. **Nature Clim. Change**, v. 6, n. 4, p. 399–401, 2015.

MARTENS, B. et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 5, p. 1903–1925, 2017.

MATONSE, A. H.; FREI, A. A seasonal shift in the frequency of extreme hydrological events in Southern New York State. **Journal of Climate**, v. 26, n. 23, p. 9577–9593, 2013.

MCMILLAN, Hilary; WESTERBERG, Ida; BRANGER, Flora. Five guidelines for selecting hydrological signatures. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 26, p. 4757–4761, 2016.

MERZ, B. et al. HESS Opinions" More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series". **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 5, p. 1379–1387, 2012.

MERZ, B. et al. Spatial coherence of flood-rich and flood-poor periods across Germany. **Journal of hydrology**, v. 559, p. 813–826, 2018.

MILLIMAN, J. D.; FARNSWORTH, K. L.; JONES, P. D.; XU, K. H.; SMITH, L. C. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951–2000. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 3–4, p. 187–194, 2008.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LATTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? **Science**, v. 319, p. 573–574, 2008.

- MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A. Potential evapotranspiration and continental drying. **Nature Climate Change**, n. June, p. 6, 2016.
- MIRALLES, D. G. et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. 2011.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010.
- MONTANARI, A.; YOUNG, G.; SAVENIJE, H. H. G.; et al. “Panta Rhei—Everything Flows”: Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 6, p. 1256–1275, 2013.
- OKI, T.; KANAIE, S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. **Science**, v. 313, n. August, p. 1068–1072, 2006.
- OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. **River Research and Applications**, v. 19, n. 2, p. 101–121, 2003.
- PAPPAS, C.; PAPALEXIOU, S. M.; KOUTSOYIANNIS, D. A quick gap filling of missing hydrometeorological data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 15, p. 9290–9300, 2014.
- PASQUINI, A. I.; DEPETRIS, P. J. Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 385–399, 2007.
- PETERSEN, T.; DEVINENI, N.; SANKARASUBRAMANIAN, A. Seasonality of monthly runoff over the continental United States: Causality and relations to mean annual and mean monthly distributions of moisture and energy. **Journal of hydrology**, v. 468, p. 139–150, 2012.
- PETERSON, T. C.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; et al. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review. **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 13, p. 1493–1517, 1998.

PETROW, T.; MERZ, B. Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002. **Journal of Hydrology**, v. 371, n. 1-4, p. 129-141, 2009.

PIAO, S.; FRIEDLINGSTEIN, P.; CIAIS, P.; et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n. 39, p. 15242-7, 2007.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; et al. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration N. **BioScience**, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.

RAMÍREZ, B. H.; TEULING, A. J.; GANZVELD, L.; HEGGER, Z.; LEEMANS, R. Tropical Montane Cloud Forests: Hydrometeorological variability in three neighbouring catchments with different forest cover. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 151-167, 2017.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, 2016.

REBOLSAS, A. C. Água doce no mundo e no Brasil. In: BRAGA, B.; TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M.; CIMINELLI (Orgs.). Águas Doces no Brasil. 4ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2015, pag. 1-36.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. **Conservation Biology**, v. 10, n. 4, p. 1163-1174, 1996.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; LINHARES, C. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Paraná Basin. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 10, p. 1254-1269, 2010.

SALAZAR, A.; BALDI, G.; HIROTA, M.; SYKTUS, J.; MCALPINE, C. Land use and land cover change impacts on the regional climate of

non-Amazonian South America: A review. **Global and Planetary Change**, v. 128, p. 103–119, 2015.

SALEMI, L. F.; GROPPPO, J. D.; TREVISAN, R.; et al. Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 100–109, 2013.

SALVIANO, M. F.; GROPPPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Brazilian Journal of Meteorology**, v. 31, n. 1, p. 64–73, 2016.

SAUQUET, E.; C. CATALOGNE. Comparison of catchment grouping methods for flow duration curve estimation at ungauged sites in France. **Hydrology and Earth System Sciences** v. 15, n. 8, 2011.

SAURRAL, R. I.; BARROS, V. R.; LETTENMAIER, D. P. Land use impact on the Uruguay River discharge. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 12, 2008.

SEAGER, R.; NAIK, N.; BAETHGEN, W.; et al. Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in southeast South America over the past century. **Journal of Climate**, v. 23, n. 20, p. 5517–5539, 2010.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **J. Am. Statist. Assoc.**, v. 63, p. 1379–1389, 1968.

SHAW, E. M.; BEVEN, K. J.; CHAPPELL, N. A.; LAMB, R. *Hydrology in Practice*. New York, EUA: Spon Press, 2011. 543 p.

SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; RODERICK, M. L. Little change in global drought over the past 60 years. **Nature**, v. 491, n. 7424, p. 435–438, 2012.

SILVA, R. W. DA C.; SALEMI, L. F.; FERNANDES, R. P.; et al. Throughfall patterns in sugarcane and riparian forest: Understanding the effect of sugarcane age and land use conversion. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 15, p. 2579–2589, 2016.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: A review. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3–4, p. 147–186, 2001.

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, 2017.

SPINONI, J.; NAUMANN, G.; CARRAO, H.; BARBOSA, P.; VOGT, J. World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2792–2804, 2014.

STATSMODELS. Statistics in Python. 2019. Disponível em: <<https://www.statsmodels.org/>>. Acesso em 20 de janeiro de 2019.

STERLING, S. M.; DUCHARNE, A.; POLCHER, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 4, p. 385–390, 2013.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**, v. 113, n. 3–4, p. 230–238, 2009.

STEWART, I. T. Connecting physical watershed characteristics to climate sensitivity for California mountain streams. **Climatic Change**, v. 116, n. 1, p. 133–148, 2012.

STEWART, I. T.; CAYAN, D. R.; DETTINGER, M. D. Changes in snowmelt runoff timing in western North America under a 'business as usual' climate change scenario. **Climate Change**, v. 62, p. 217–232, 2004.

SUN, F.; RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. Changes in the variability of global land precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 18, p. 1–6, 2012.

SVENSSON, C.; KUNDZEWICZ, Z. W.; MAURER, T. Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 5, p. 811–824, 2005.

TETZLAFF; SEIBERT, J.; MCGUIRE, K. J.; et al. How does landscape structure influence catchment transit time across different geomorphic provinces? **Hydrological Processes**, v. 23, p. 945–953, 2009.

TETZLAFF, D.; AL-RAWAS, G.; BLÖSCHL, G.; CAREY, S. K.; FAN, Y.; HRACHOWITZ, M.; KIRNBAUER, R.; JEWITT, G.; LAUDON, H.; MCGUIRE, K. J.; SAYAMA, T.; SOULSBY, C.; ZEHE, E.; WAGENER, T. Process realism: flow paths and storage. In: BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. (Org.). *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2013, cap 4, p 53-69.

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I. **Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen**, v. 53, n. 1950, p. 386–392, 1950.

TOTH, E. Catchment classification based on characterisation of streamflow and precipitation time series. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 1149–1159, 2013.

TRENBERTH, K. E. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1–2, p. 123–138, 2011.

TRENBERTH, K. E. et al. Global warming and changes in drought. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 17, 2014.

TROCH, P. A.; LAHMERS, T.; MEIRA, A.; et al. Catchment coevolution: A useful framework for improving predictions of hydrological change? **Water Resources Research**, p. 2742–2759, 2015.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene. Maryland, EUA: 2006. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.

VAN LOON, A. F.; LAAHA, G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 3–14, 2015.

VARGAS, W. M.; NAUMANN, G.; MINETTI, J. L. Dry spells in the River Plata Basin: An approximation of the diagnosis of droughts using daily data. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 104, n. 1–2, p. 159–173, 2011.

VIGLIONE, A.; MERZ, B.; DUNG, N. V.; et al. Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. **Water Resources Research**, p. 1–19, 2016.

VILLAR, J. C.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J.; et al. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3–4, p. 297–311, 2009.

VILLARINI, G.; SMITH, J. A.; VECCHI, G. A. Changing frequency of heavy rainfall over the central United States. **Journal of Climate**, v. 26, n. 1, p. 351–357, 2013.

VILLARINI, G. On the seasonality of flooding across the continental United States. **Advances in Water Resources**, v. 87, p. 80–91, 2016.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves II: a review of applications in water resources planning. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 31, n. 6, p. 1029–1039, 1995.

VON STORCH, H. Misuses of statistical analysis in climate research. In: **Analysis of Climate Variability**. Berlin: Springer, 1999.

WAGENER, T.; BLÖSCHL, G.; GOODRICH, D. C.; GUPTA, H. V.; SIVAPALAN, M.; TACHIKAWA, Y.; TROCH, P. A.; WEILER, M. A synthesis framework for runoff prediction in ungauged basins. In: BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; VIGLIONE, A.; SAVENIJE, H. (Org.). *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2013, cap 2, p 12–28.

WESTERBERG, I. K.; WAGENER, T.; COXON, G.; et al. Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. **Water Resources Research**, v. 52, n. 3, p. 1847–1865, 2016.

WIJNGAARD, J. B.; KLEIN TANK, A. M. G.; KÖNNEN, G. P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and

precipitation series. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 6, p. 679–692, 2003.

WILKS, Daniel S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.

WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; et al. The hydrology of the humid tropics. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 9, p. 655–662, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 2659, n. October 2015, p. 2644–2659, 2015.

YADAV, M.; WAGENER, T.; GUPTA, H. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. **Advances in Water Resources**, v. 30, n. 8, p. 1756–1774, 2007.

YOKOO, Y.; SIVAPALAN, M. Towards reconstruction of the flow duration curve: Development of a conceptual framework with a physical basis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 9, p. 2805–2819, 2011.

YUE, S.; PILON, P. A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, p. 21-37, 2004.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002.

ZARGAR, A.; SADIQ, R.; NASER, B.; KHAN, F. I. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.

ZEILHOFER, P.; DE MOURA, R. M. Hydrological changes in the northern Pantanal caused by the Manso dam: Impact analysis and suggestions for mitigation. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 1, p. 105–117, 2009.

ZHANG, H.; DELWORTH, T. L.; ZENG, F.; et al. Detection, attribution, and projection of regional rainfall changes on (multi-) decadal time scales: A focus on southeastern South America. **Journal of Climate**, v. 29, n. 23, p. 8515–8534, 2016.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2016.

APÊNDICE A: ESTAÇÕES DE CHUVA DESCARTADAS OU ALTERADAS COM O CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS

Tabela A1. Estações pluviométricas descartadas ou alteradas com o controle de qualidade de dados.

Código	Problema	Solução
239001	Chuvas com valores negativos.	Remover
268000	Mudança brusca em 1994.	Remover
361000	Mudança brusca em 1992.	Remover
366000	Mudança brusca em 2008.	Remover
367000	Mudança brusca em 2009.	Remover
535038	Mudança brusca em 1984.	Remover
567001	Mudança brusca em 2006.	Remover
645004	Mudança brusca em 2003.	Remover
661001	Mudança brusca em 1998.	Remover
759000	Mudança brusca em 1991.	Remover
765001	Diversas mudanças bruscas ao longo da série.	Remover
835136	Mudança brusca em 1998.	Remover
872000	Diversas mudanças bruscas ao longo da série.	Remover
968001	Mudança brusca em 2008.	Remover
1047000	Mudança brusca em 1996.	Remover
1456005	Chuva igual a zero de 1996 a 1998.	Remover
1552001	Chuva igual a zero de 1980 a 1985.	Remover
1555001	Mudança brusca em 2006.	Remover
1556000	Mudança brusca em 1983 e 2008.	Remover
2147069	Mudança brusca em 1990.	Remover
2147077	Mudança brusca em 2005.	Remover
2150025	Mudança brusca em 2001.	Remover
2150040	Mudança brusca em 2001.	Remover
2242012	Mudança brusca em 2004.	Remover
2247075	Mudança brusca em 1981.	Remover
2247182	Mudança brusca em 2014.	Remover
2247196	Mudança brusca em 2014.	Remover
2345008	Mudança brusca em 2006.	Remover

Tabela A1 (continuação).

Código	Problema	Solução
2345032	Mudança brusca em 2001.	Remover
2345161	Mudança brusca em 1988.	Remover
2346073	Mudança brusca em 1996.	Remover
2348078	Mudança brusca em 1994.	Remover
2349005	Mudança brusca em 2013.	Remover
2349030	Mudança brusca em 2014.	Remover
2447042	Mudança brusca em 2014.	Remover
2447044	Mudança brusca em 2014.	Remover
2449000	Mudança brusca em 1996.	Remover
2449019	Mudança brusca em 1996.	Remover
2449026	Mudança brusca em 1990.	Remover
2449028	Mudança brusca em 1990.	Remover
2450040	Mudança brusca em 1984.	Remover
2450048	Mudança brusca em 1988.	Remover
2453030	Mudança brusca em 1983.	Remover
2548001	Chuva com ordens de grandeza menor que as estações vizinhas.	Remover
2548041	Mudança brusca em 1989.	Remover
2548049	Mudança brusca em 1994.	Remover
2552046	Mudança brusca em 1993.	Remover
2554001	Mudança brusca em 2007.	Remover
2748001	Mudança brusca em 2002.	Remover
2748019	Mudança brusca em 1986.	Remover
2950031	Mudança brusca em 1998.	Remover
8062000	Mudança brusca em 1992.	Remover
2245080	Mudança brusca em 1989.	Remover
2548044	Mudança brusca em 1999.	Remover
2344009	Mudanças bruscas em 1983 e 2004.	Remover
344011	Mudança brusca em 2006.	Remover
2142014	Mudança brusca em 1984.	Remover
1754000	Mudança brusca em 2008.	Remover
1846004	Mudança brusca em 1992.	Remover

Tabela A1 (continuação).

Código	Problema	Solução
2551011	Mudança brusca em 1988.	Remover
3252024	Mudança brusca em 1987.	Remover
2144024	Mudanças bruscas em 1933 e 1992.	Remover
2244064	Mudança brusca em 2000.	Remover
1943007	Mudança brusca em 1997.	Remover

APÊNDICE B: ESTAÇÕES DE VAZÃO DESCARTADAS OU ALTERADAS COM O CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS

Tabela B1. Estações fluviométricas descartadas ou alteradas com o controle de qualidade de dados.

Código	Problema	Solução
12870000	Vazões anuais acima de 40 mil mm.	Estação removida.
22900000	Apenas os valores baixos da série a partir de 2008 está indisponível.	Dados após 2008 desconsiderados.
24780000	Apenas os valores baixos da série a partir de 2008 está indisponível.	Dados após 2008 desconsiderados.
26100000	Apenas os valores baixos da série a partir de 2008 está indisponível.	Dados após 2008 desconsiderados.
33420000	Dados iguais a zero no lugar de falhas ao longo de mais de 5 anos.	Estação removida.
39560000	Salto brusco na série em 2015, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
40269900	Salto brusco na série em 2008, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
40549998	Salto brusco na série em 2014.	Dados após 2014 desconsiderados.
40680000	Salto brusco na série em 2007, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
42395000	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
46455000	Salto brusco na série em 2011.	Dados após 2011 desconsiderados.
46675000	Salto brusco na série em 2007.	Dados não consistidos desconsiderados.
55699998	Salto brusco na série em 1984.	Dados antes de 1984 desconsiderados.
55895000	Salto brusco na série em 2008, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
56750000	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
58500000	Salto brusca na série em 2008.	Estação removida.

Tabela B1 (continuação).

Código	Problema	Solução
60100000	Alguns anos com vazão maior que a chuva.	Estação removida.
60925001	Vazões anuais abaixo de 5 mm.	Estação removida.
61085000	Vazões anuais maiores que a chuva.	Estação removida.
61429000	Vazões anuais maiores que a chuva.	Estação removida.
61912500	Aprox. 5 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Substituição dos dados diários maiores que 100 mm por falhas.
62095100	Aprox. 10 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Estação removida.
62110000	Aprox. 3 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Substituição dos dados diários maiores que 100 mm por falhas.
62605000	Aprox. 5 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Estação removida.
62632000	Aprox. 2 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Substituição dos dados diários maiores que 100 mm por falhas.
62676000	Aprox. 5 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Substituição dos dados diários maiores que 100 mm por falhas.
62760130	Saltos bruscos ao longo da série.	Estação removida.
63160000	Aprox. 2 anos com vazões diárias maiores que mil mm.	Substituição dos dados diários maiores que 100 mm por falhas.
64346000	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
64620000	Após 2004 todas as vazões diárias são menores que 0.01 mm.	Estação removida.
64675002	Vazões anuais maiores que a chuva.	Estação removida.
64685000	Salto brusco na série em 2008, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
64773000	Salto brusco na série em 2004, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Estação removida.
64785000	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
64799500	Salto brusco na série em 2008, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.

Tabela B1 (continuação).

Código	Problema	Solução
65009000	Salto brusco na série em 1998, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Estação removida.
65011400	Vazões anuais maiores que a chuva.	Estação removida.
65015400	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
65019700	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
65027000	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
65415000	Salto brusco na série em 2010, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
65825000	Após 2006 todas as vazões diárias são menores que 0.01 mm.	Dados após 2006 desconsiderados.
82195002	Vazões anuais acima de 10 mil mm.	Estação removida.
86420000	Salto brusco na série em 2007, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.
88850000	Salto brusco na série em 2007, coincidente com mudança na consistência dos dados.	Dados não consistidos desconsiderados.

APÊNDICE C: MEDIANA DA SÉRIE ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES MÉDIAS

Figura C1. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva média anual, (b) desvio padrão da vazão diária, (c) sazonalidade da chuva média, e (d) centroide do tempo da chuva diária. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas.

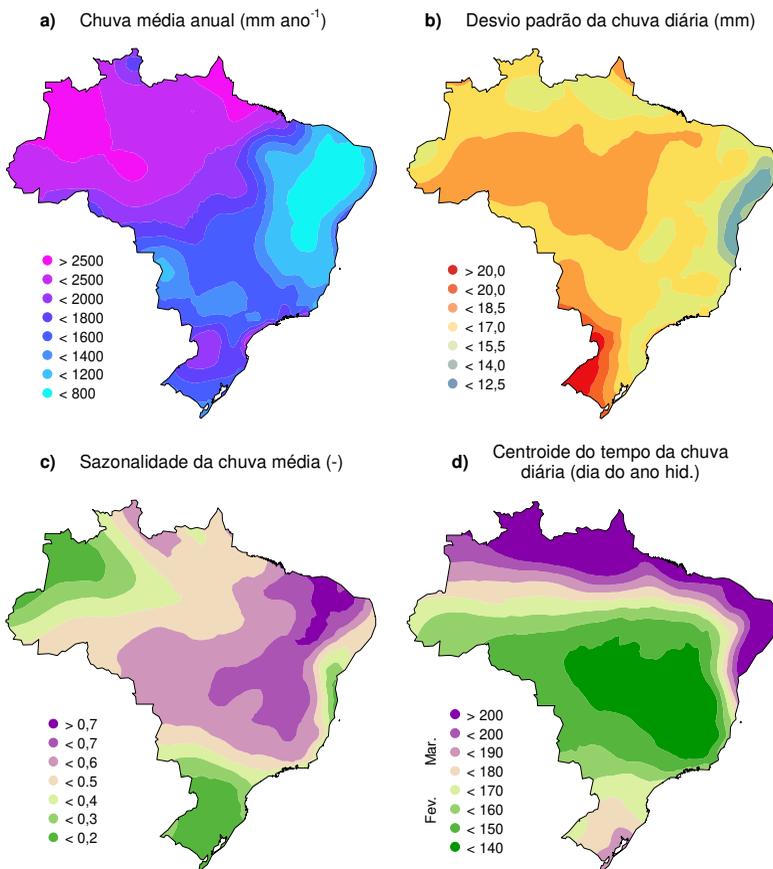
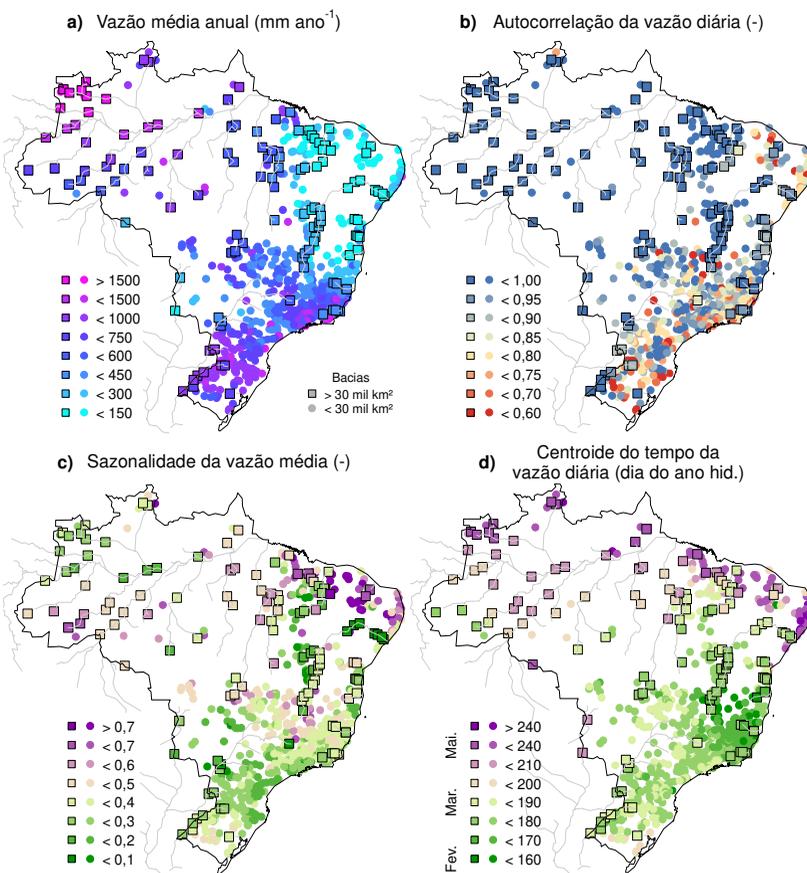


Figura C2. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão média anual, (b) autocorrelação da vazão diária, (c) sazonalidade da vazão média, e (d) centroide do tempo da vazão diária. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza.



APÊNDICE D: MEDIANA ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES ALTAS

Figura D1. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva diária máxima anual, (b) dia da chuva máxima de uma média móvel de 5 dias, (c) frequência anual de chuvas intensas, e (d) chuva intensa de maior duração do ano. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas.

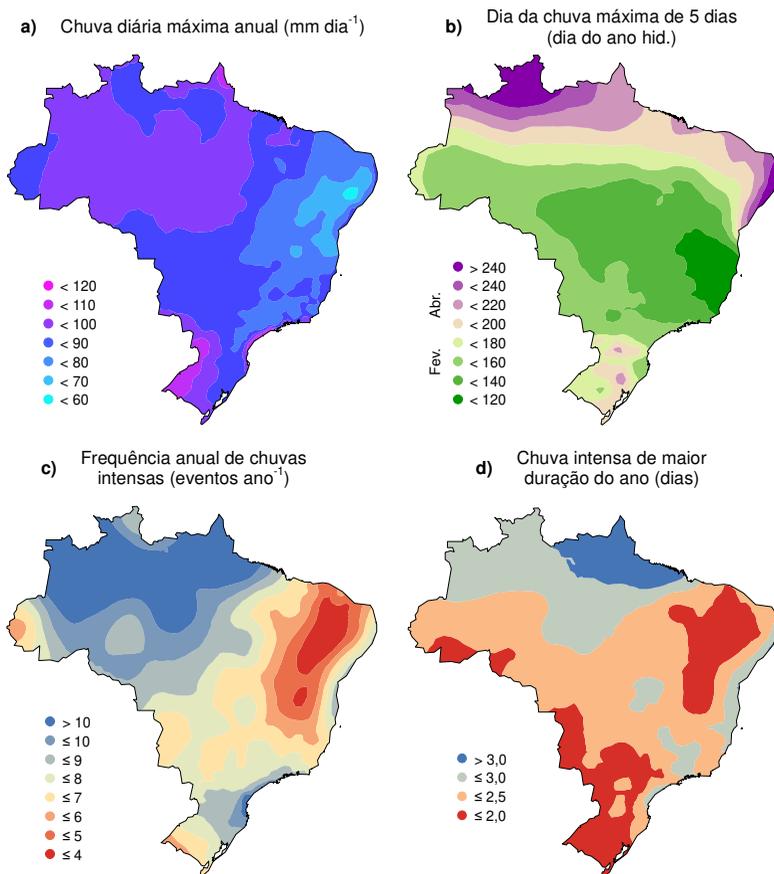
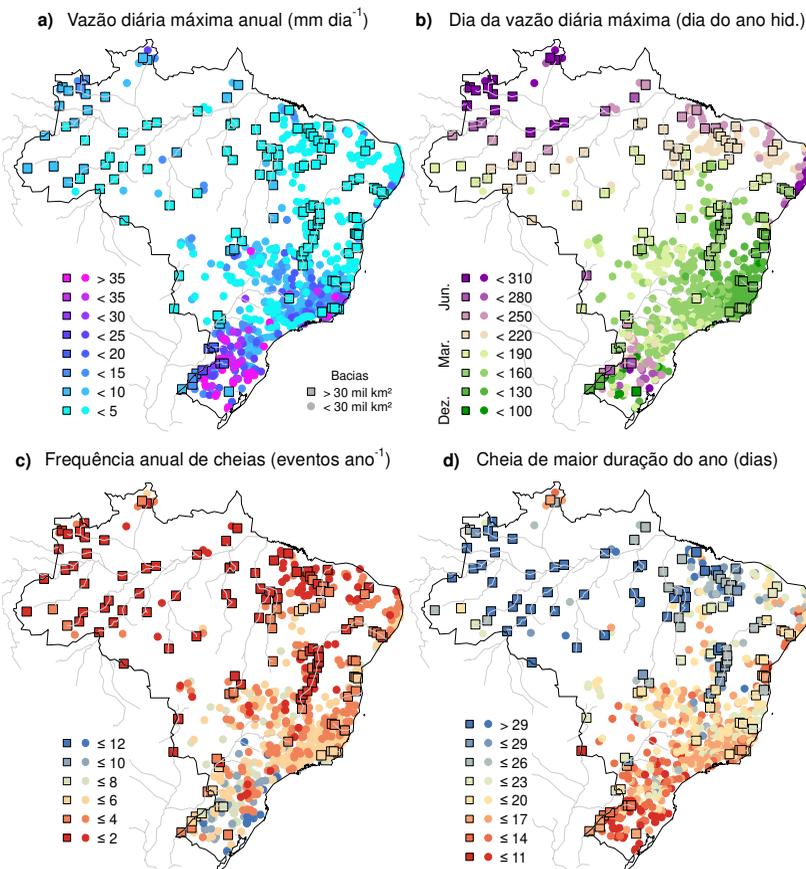


Figura D2. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão diária máxima anual, (b) dia da vazão diária máxima anual, (c) frequência anual de cheias, e (d) cheia de maior duração do ano. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos da água são representados pelas linhas em cinza.



APÊNDICE E: MEDIANA ANUAL DOS ÍNDICES DE CONDIÇÕES BAIXAS

Figura E1. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) chuva média entre os percentis 0 e 20, (b) dia de início do evento sem chuva de maior duração, (c) frequência anual de eventos sem chuva, e (d) duração média anual dos eventos sem chuva. A interpolação espacial se deu com a krigagem ordinária a partir das 2323 estações pluviométricas.

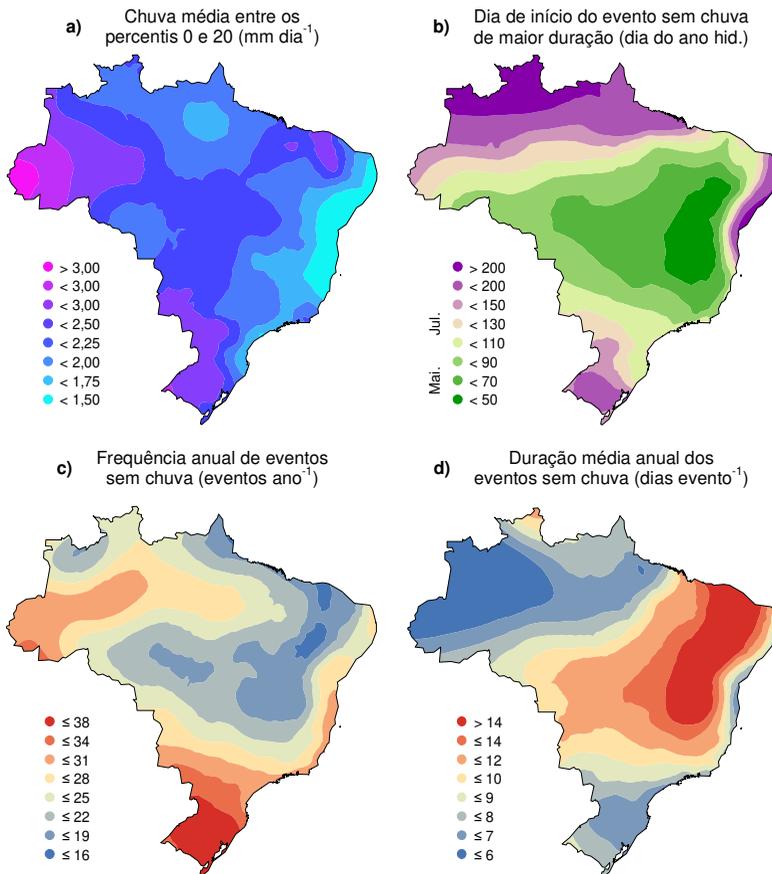
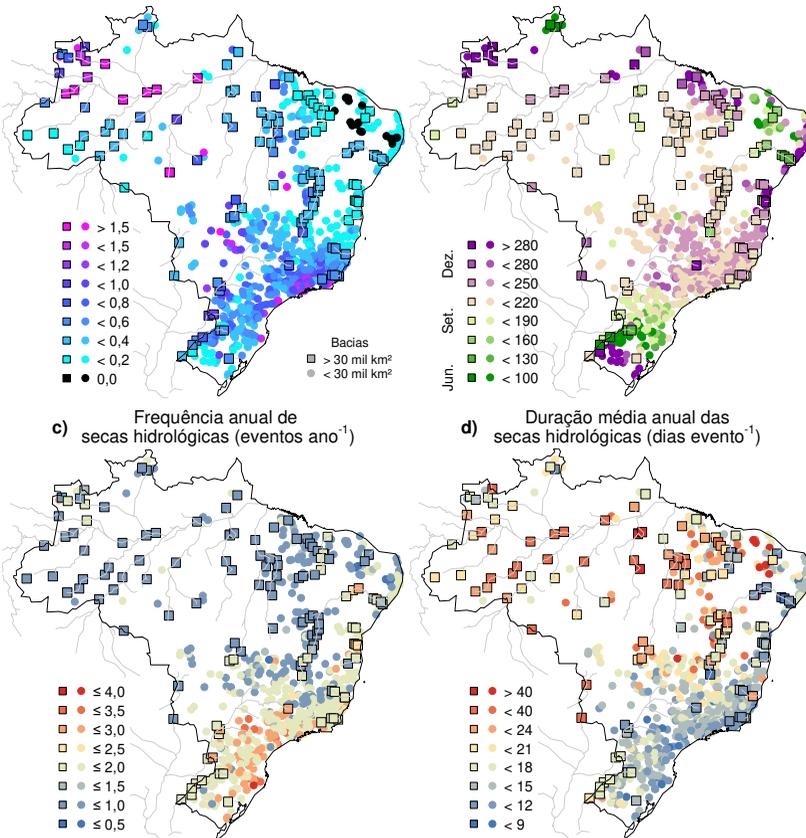


Figura E2. Mediana da série anual de 1980 a 2015 da (a) vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (b) dia da vazão mínima anual da média móvel de 7 dias, (c) frequência anual de secas hidrológicas, e (d) duração média anual das secas hidrológicas. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados. Cursos de água são representados pelas linhas em cinza.

a) Vazão mínima anual de 7 dias (mm dia⁻¹) b) Dia da vazão mínima de 7 dias (dia do ano hid.)



APÊNDICE F: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS FORÇANTES HIDROLÓGICAS DE ΔQ_{MED} , ΔQ_{MAX} , E ΔQ_{MIN}

Figura F1. (a) Mediana da série anual de 1980 a 2015 da evapotranspiração média anual. Tendência de Theil-Sen da evapotranspiração média anual em (b) mm por ano e (c) porcentagem da evapotranspiração mediana por ano. As tendências com símbolo preenchido são significativas para alpha de 0,05. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.

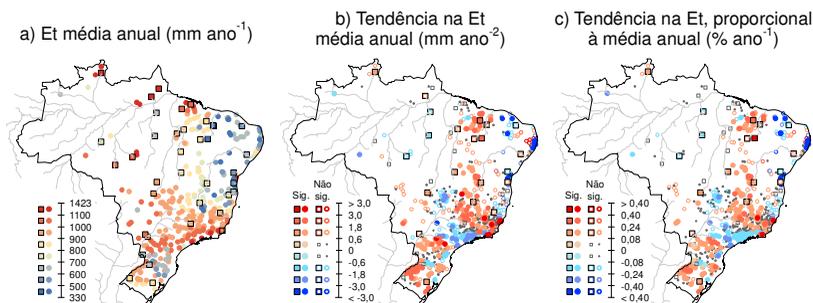


Figura F2. (a) Geração elétrica e anos de construção das Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE). Número de UHEs construídas por bacia (b) antes de 1980 e (c) entre 1980 e 2015. Geração elétrica por bacia das UHEs construídas (d) antes de 1980 e (e) entre 1980 e 2015.

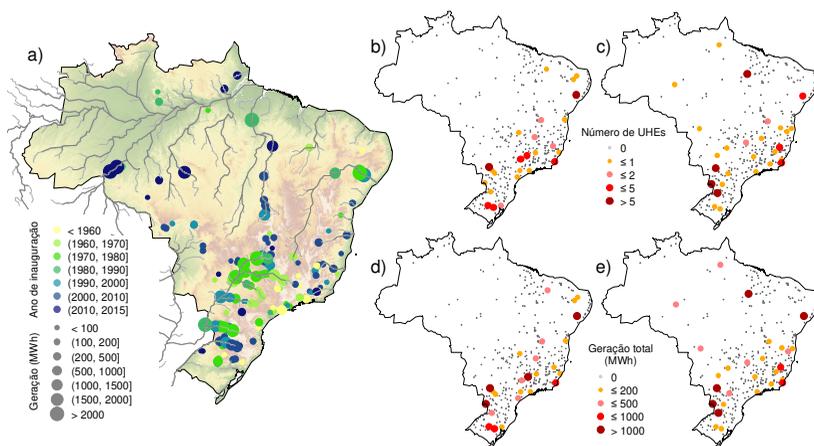


Figura F3. (a) Demandas hídricas de 2015 por microbacia segundo a fonte dos dados (ANA, 2015). Demanda hídrica de 2015 por bacia (b) em mm por ano e (c) em porcentagem da vazão média anual. Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.

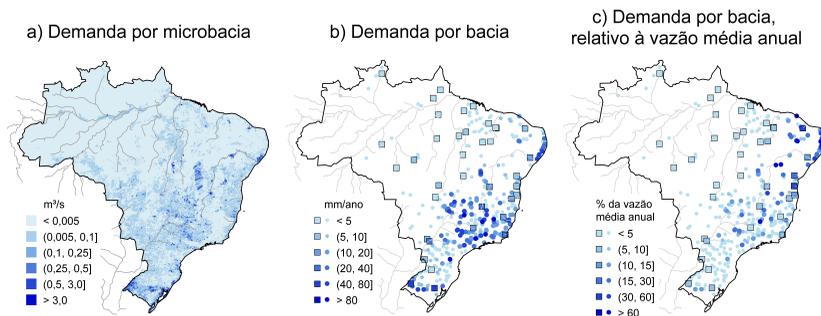


Figura F4. Cobertura de florestas naturais de cada bacia em (a) 1985 e (b) 2015. (c) Diferenças nas coberturas florestais entre 1985 e 2015, onde o tamanho do círculo indica a área da bacia.

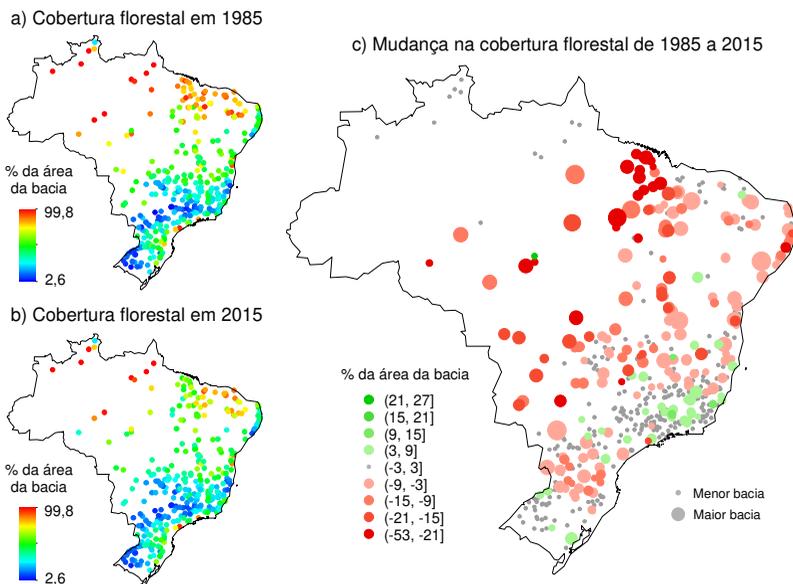
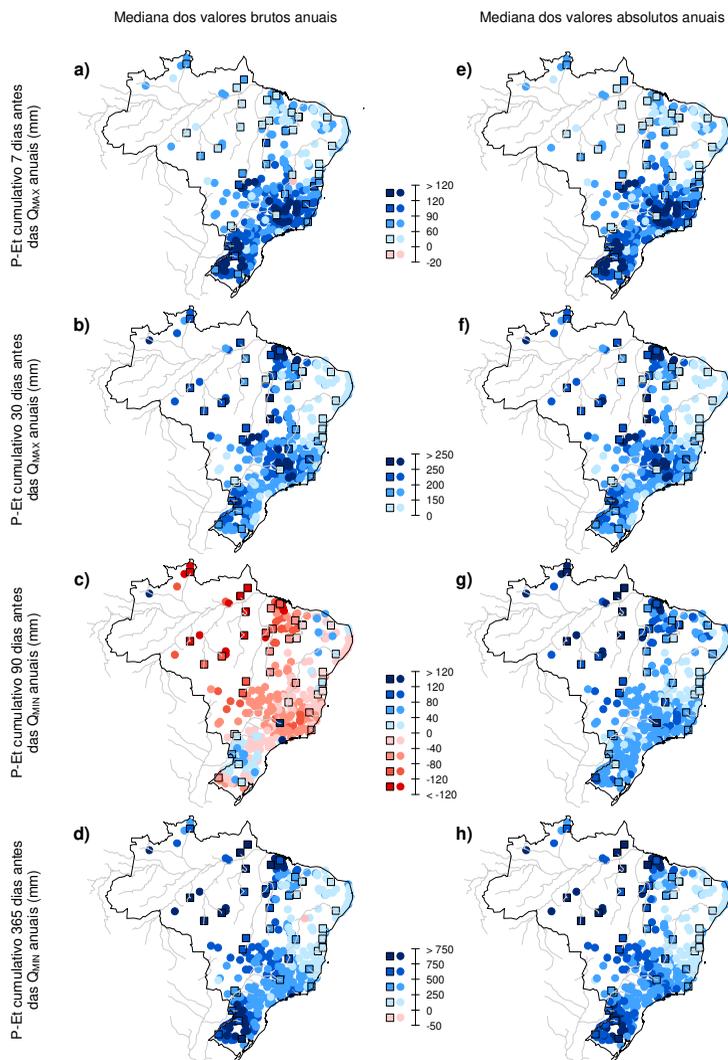


Figura F5. Mediana da série anual do balanço de chuva menos evapotranspiração de: (a) 7 dias antes dos eventos da vazão máxima anual; (b) 30 dias antes dos eventos da vazão máxima; (c) 90 dias antes dos eventos da vazão mínima; e (d) 365 dias antes dos eventos da vazão mínima. (e)-(h): mediana dos valores absolutos de (a)-(e). Bacias maiores que 30 km² são representadas por quadrados.



APÊNDICE G: GRÁFICOS DE DISPERSÃO DAS FORÇANTES HIDROLÓGICAS DE ΔQ_{MED} , ΔQ_{MAX} , E ΔQ_{MIN}

Figura G1. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão média anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.

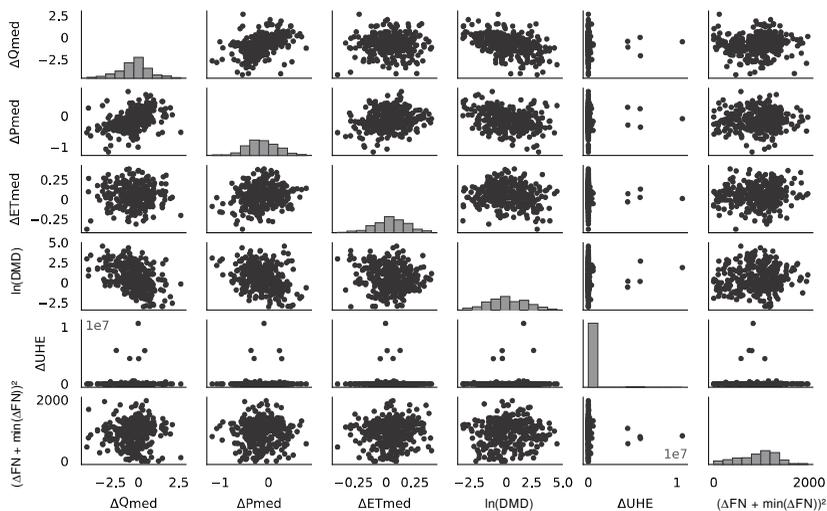


Figura G2. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão diária máxima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.

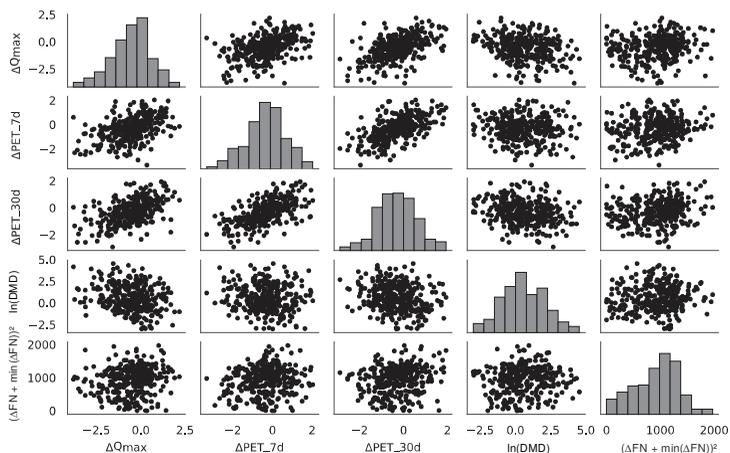
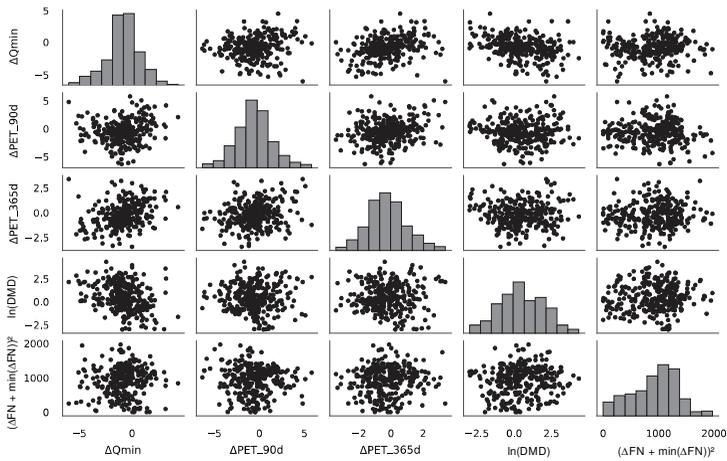


Figura G3. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão mínima anual e os índices das suas forçantes hidrológicas.



APÊNDICE H: GRÁFICOS DIAGNÓSTICO DA REGRESSÃO DE ΔQ_{MED} , ΔQ_{MAX} , E ΔQ_{MIN}

Figura H1. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{med}^* em função das variáveis independentes (a) ΔP_{med}^* , (b) ΔET_{med}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* .

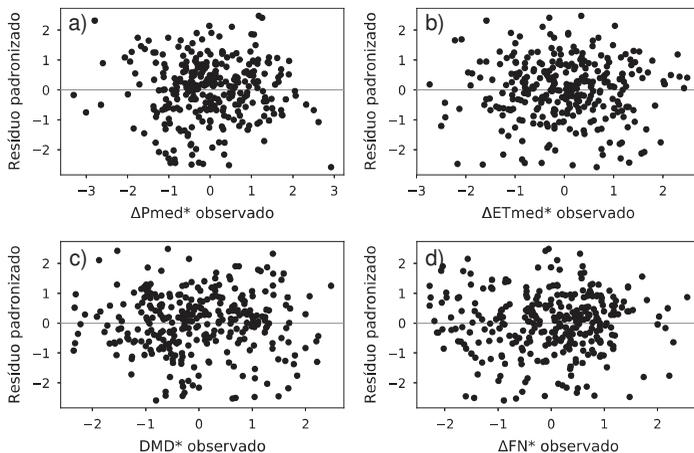


Figura H2. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{max}^* em função das variáveis independentes (a) ΔPET_{7d}^* , (b) ΔPET_{30d}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* .

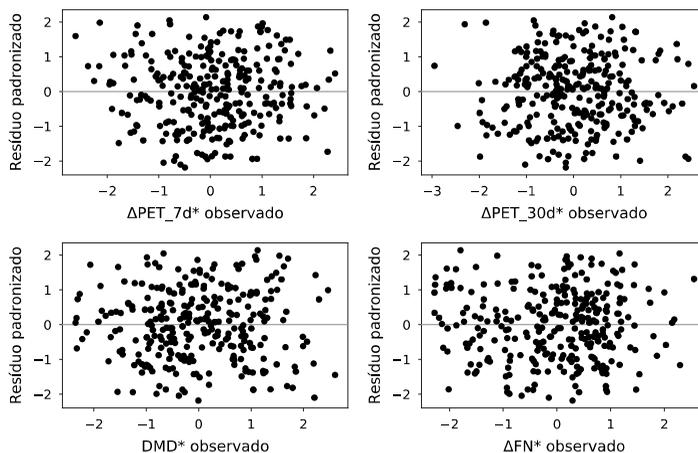
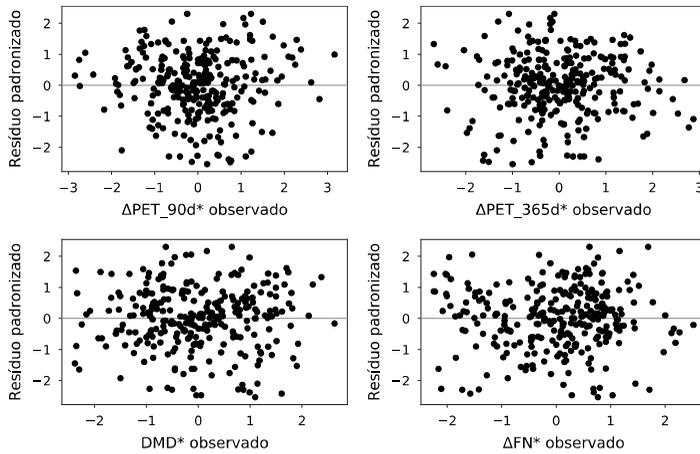


Figura H3. Resíduos padronizados da regressão de ΔQ_{min}^* em função das variáveis independentes (a) ΔPET_{90d}^* , (b) ΔPET_{365d}^* , (c) DMD^* , e (d) ΔFN^* .



APÊNDICE I: GRÁFICOS DE DISPERSÃO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

Figura 11. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão diária máxima anual (ΔQ_{max}) e no balanço de chuva e evapotranspiração 7 dias antes da máxima (ΔPET_{7d}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A cor do símbolo varia segundo: (a) tendência no balanço de chuva e evapotranspiração 30 dias antes da máxima; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais.

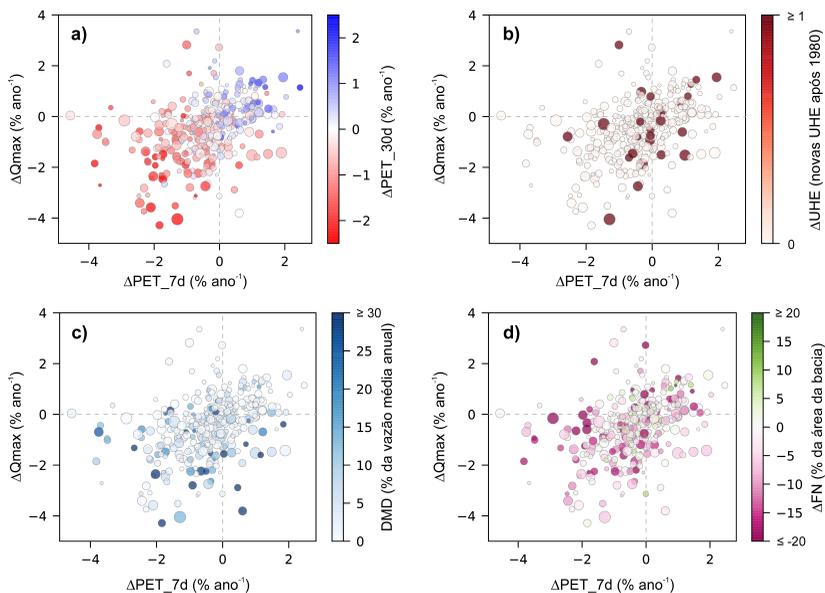


Figura I2. Gráficos de dispersão entre as tendências na vazão mínima anual (ΔQ_{\min}) e no balanço de chuva e evapotranspiração 365 dias antes da mínima (ΔPET_{365d}). O tamanho do símbolo varia em função da área da bacia. A cor do símbolo varia segundo: (a) tendência no balanço de chuva e evapotranspiração 90 dias antes da mínima; (b) construção de UHE; (c) demanda hídrica; (d) mudança na cobertura de florestas naturais.

