



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Alena Gonzalez Bevacqua

**PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DA PROPAGAÇÃO DE SECAS
METEOROLÓGICAS PARA HIDROLÓGICAS NO BRASIL**

Florianópolis

2021

Alena Gonzalez Bevacqua

**PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DA PROPAGAÇÃO DE SECAS
METEOROLÓGICAS PARA HIDROLÓGICAS NO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Ambiental
Orientador: Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Florianópolis

2021

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

Bevacqua, Alena Gonzalez
Padrões espaciais e temporais da propagação de secas
meteorológicas para hidrológicas no Brasil / Alena Gonzalez
Bevacqua ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, 2021.
99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Secas. 3. Secas
meteorológicas. 4. Secas hidrológicas. 5. Propagação de
secas. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental. III. Título.

Alena Gonzalez Bevacqua

**PADRÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DA PROPAGAÇÃO DE SECAS
METEOROLÓGICAS PARA HIDROLÓGICAS NO BRASIL**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Carlos Henrique Ribeiro Lima, Dr.

Universidade de Brasília

Dr. José Antônio Marengo Orsini

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Valmir da Silva, Dr.

Universidade Federal da Fronteira Sul

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Orientador(a)

Florianópolis, 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, por me proporcionar uma educação pública de qualidade. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado que tornou este trabalho possível.

Ao Prof. Pedro pela oportunidade de fazer parte do LabHidro e de poder realizar esse trabalho, por toda ajuda, pela confiança, paciência, pelo incentivo constante e por sempre mostrar que podemos ir além.

Aos meus pais, Daisy e Luís, pelo amor incondicional, incentivo, por me apoiarem em todas as minhas decisões e por todo suporte emocional e financeiro. Ao meu irmão, Luís, por todo apoio e por ser o meu melhor amigo.

Ao Renato, por ter estado ao meu lado durante todo esse processo, pelo apoio e incentivo constante.

Aos amigos do LabHidro, motivação e por tornarem os dias de trabalho muito mais divertidos. Em especial ao Gabriel, por toda ajuda e por ser um grande amigo e ao Vinícius, pela disponibilidade de tempo, paciência e por todas as sugestões.

Aos membros da banca, Prof. Carlos Lima, Dr. José Marengo, Prof. Leonardo Hoinaski e ao Prof. Roberto Silva, pela disponibilidade de tempo e pelas valiosas contribuições para tornar este trabalho melhor.

Muito Obrigada!

RESUMO

Eventos de secas meteorológicas se propagam pelo ciclo hidrológico dando origem a secas hidrológicas. Compreender como esse processo funciona é essencial para melhorar o monitoramento, a previsão e a gestão dos eventos de secas. No entanto, os efeitos do clima e as características das bacias na propagação de secas hidrológicas variam regionalmente e ainda permanecem desconhecidos. Neste trabalho, foram identificados e caracterizados os eventos de secas meteorológicas e hidrológicas em 457 bacias hidrográficas no Brasil para o período de 1980 a 2015. Para isso, foi utilizado o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI) como indicador de seca meteorológica e o Índice de Vazão Padronizado (SSI) como indicador de seca hidrológica. Cinco indicadores foram utilizados para estimar o tempo de propagação entre secas meteorológicas e hidrológicas. O primeiro utilizou a correlação de Pearson para comparar as séries de SPEI e SSI. Os outros quatro indicadores representam a diferença entre início, pico, final e centro de massa dos eventos de seca. Além disso, foi calculado o tempo de recuperação das secas meteorológicas e hidrológicas e analisada a relação dos principais controles nos eventos de secas. Os resultados indicam que as secas hidrológicas são geralmente mais duradouras, severas e possuem um tempo de recuperação mais lento comparado com as secas meteorológicas. Enquanto a maioria dos eventos severos de secas meteorológicas acontecem em regiões úmidas (i.e., Amazônia e o Sul do Brasil), a maioria dos eventos severos e duradouros de seca hidrológica ocorrem nas regiões secas (i.e., Nordeste) ou em regiões com maior influência antrópica (i.e., Sudeste). Secas hidrológicas nessas regiões mais secas podem levar quatro vezes mais tempo para se recuperar do que os eventos de seca meteorológicas. Bacias com alto índice de escoamento de base possuem menos eventos de seca hidrológica, porém esses eventos são mais duradouros e mais severos. A região Sul apresentou uma propagação em torno de 2 meses para todos os indicadores analisados. Já para as outras regiões o tempo de propagação variou dependendo do indicador utilizado. O tempo de propagação depende completamente do indicador e metodologia utilizada. Sendo assim, os resultados destacam a importância da utilização de multi-indicadores para caracterizar os mecanismos que controlam o desenvolvimento e propagação de secas ao longo do ciclo hidrológico.

Palavras-chaves: Propagação de Secas; Secas meteorológicas; Secas hidrológicas; Índices padronizados de seca; Brasil.

ABSTRACT

The propagation of meteorological droughts through the hydrological cycle gives rise to hydrological droughts. Understanding how this process develops is essential to improving the monitoring, forecasting, and management. However, the effects of climate and basin characteristics on drought propagation vary regionally and are still poorly understood. In this work, we identify and characterize meteorological and hydrological droughts events for 457 basins in Brazil for the period 1980 to 2015. The Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) is used as an indicator of meteorological drought and the Standardized Streamflow Index (SSI) as an indicator of hydrological droughts. We use five indicators to estimate the propagation time from a meteorological to a hydrological drought. The first indicator is based on Pearson's correlation of the SPEI and SSI series. The other four indicators estimate the drought propagation based on the time difference of the onset, peak, end, and center of mass between the meteorological and hydrological droughts. We also analyze the recovery time of meteorological and hydrological droughts and droughts main controls. The results show that hydrological droughts are more long-lasting, severer, and have a slower recovery time in comparison to meteorological droughts. While most severe meteorological drought events occurred in humid regions (i.e., Amazon and Southern Brazil), most severe and long-lasting hydrological drought events occurred in dry regions (i.e., Northeast) or in a region with greater anthropic influence (i.e., Southeast). Hydrological droughts, in those drier regions, can take over four times longer to recover than meteorological drought events. Basins with high baseflow index had fewer hydrological droughts, but these events were longer-lasting and more severe. Drought propagation in the southern region is around 2 months for all indicators analyzed. For the other regions, the propagation time varied depending on the indicator. Therefore, we conclude that the analysis of the propagation time may depend completely on the methodology being used. This thesis highlights the importance of using multi-indicators to characterize the mechanisms that control the development and propagation of droughts throughout the hydrological cycle.

Keywords: Drought propagation; Meteorological drought; Hydrological drought; Standardized drought indices; Brazil.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Classificação dos eventos de secas 30
- Figura 2 - Propagação das anomalias na precipitação através da parte terrestre ciclo hidrológico para uma série sintética. A média é representado por 0, anomalia positivas por + e anomalias negativas por -. 34
- Figura 3 – Características da propagação de secas meteorológicas para secas hidrológicas. . 35
- Figura 4 - (a) Localização das 457 estações fluviométricas classificadas de acordo com suas regiões hidrográficas. (b) Precipitação e (c) vazão média anual. O tamanho dos marcadores varia proporcionalmente à área das bacias hidrográficas. 39
- Figura 5 – (a) Série de SSI para a escala de tempo de 12 meses, a área destacada em cinza corresponde a parte da série exibida em (b). As características dos eventos como a duração, severidade (área vermelha), tempo de pico (t_{pico}), tempo final (t_{final}) e tempo de recuperação (r_{time}) são mostrados em (b). 43
- Figura 6 – (a) Série de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses, a área destacada em cinza corresponde a parte da série exibida em (b). Quatro indicadores para estimar o tempo de propagação são apresentados em (b). i_{SPEI} e i_{SSI} representam o tempo de início do dos eventos de seca, sendo Δi a diferença entre eles. p_{SPEI} e p_{SSI} representam o tempo de pico das secas, sendo Δp a diferença entre os tempos de pico. f_{SPEI} e f_{SSI} representam o tempo de final dos eventos, sendo Δf a diferença entre eles. c_{SPEI} e c_{SSI} representam o centro de massa dos eventos, sendo Δc a diferença entre os centros de massa. (c) Série de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses para outra bacia hidrográfica. Faixas cinzas são os eventos de secas hidrológicas que ocorrem devido a um evento de seca meteorológica, faixas em vermelho são eventos que ocorrem devido a eventos múltiplos. Em azul são os eventos de seca meteorológica que não dão origem aos eventos hidrológicas. Em vermelho são eventos de secas hidrológicas que ocorrem sozinhos. 47
- Figura 7 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 6 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias. 50
- Figura 8 - Tendência nas séries de SPEI e SSI para as escalas de tempo de 3, 6 e 12 meses para as 457 bacias analisadas. Os marcadores com borda grossa apresentaram tendências

significativas para o teste de Mann-Kendall. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias hidrográficas.....	50
Figura 9 - Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 6 meses.	51
Figura 10 - Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 6 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas.	52
Figura 11 – Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 6 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A barra intermediária dos <i>boxplots</i> indicam a mediana, as caixas indicam os percentis 25 e 75, e os bigodes têm extensão máxima de 1.5 vezes o intervalo entre quartis. Para melhor visualização, outliers não foram inclusos nos <i>boxplots</i>	53
Figura 12 - (a) <i>rtime</i> , SPEI e (b) <i>rtime</i> , SSI para a escala de tempo de 6 meses. (c) <i>Boxplot</i> do <i>rtime</i> , SPEI (cores claras) e <i>rtime</i> , SSI (cores escuras). (d) <i>txr</i> para 6 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do <i>boxplot</i> é a mesma da Figura 11.	54
Figura 13 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 6 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.	55
Figura 14 - Correlação de Pearson entre todos as escalas de tempo do SPEI com as séries de SSI-1. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.....	56
Figura 15 - <i>Scatterplot</i> das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	60

Figura 16 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	61
Figura 17 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	61
Figura 18 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	62
Figura 19 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma da área da bacia. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	62
Figura 20 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização da bacia e o histograma do grau de regularização da bacia. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	63
Figura 21 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 6 meses. Número de eventos, duração média, severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).	64
Figura 22 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 6 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).	65

Figura A1 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 3 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias.	79
Figura A2 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias.	80
Figura A3 – Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 3 meses.	81
Figura A4 – Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 12 meses.	82
Figura B1 - (a) Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 3 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas. (b) Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 3 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A descrição do <i>boxplot</i> é a mesma da Figura 11.	83
Figura B2 - (a) Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 12 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas. (b) Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 12 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A descrição do <i>boxplot</i> é a mesma da Figura 11.	84
Figura C1 - (a) $\bar{r}_{time,SPEI}$ e (b) $\bar{r}_{time,SSI}$ para a escala de tempo de 3 meses. (c) <i>Boxplot</i> do $\bar{r}_{time,SPEI}$ (cores claras) e $\bar{r}_{time,SSI}$ (cores escuras). (d) tx_r para 3 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do <i>boxplot</i> é a mesma da Figura 11.	85
Figura C2 - (a) $\bar{r}_{time,SPEI}$ e (b) $\bar{r}_{time,SSI}$ para a escala de tempo de 12 meses. (c) <i>Boxplot</i> do $\bar{r}_{time,SPEI}$ (cores claras) e $\bar{r}_{time,SSI}$ (cores escuras). (d) tx_r para 12 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do <i>boxplot</i> é a mesma da Figura 11.	86

Figura D1 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 3 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.	87
Figura D2 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 12 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.	88
Figura F1 - <i>Scatterplot</i> das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	89
Figura F2 - <i>Scatterplot</i> das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	90
Figura F3 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual para e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	91
Figura F4 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	91
Figura F5 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	92
Figura F6 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	92

Figura F7 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	93
Figura F8 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	93
Figura F9 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma das áreas das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	94
Figura F10 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma das áreas das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	94
Figura F11 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização das bacias e o histograma do grau de regularização das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	95
Figura F12 - <i>Scatterplot</i> dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização das bacias e o histograma do grau de regularização das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.	95
Figura F13 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 3 meses. Número de eventos, duração média, severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).....	96
Figura F14 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 12 meses. Número de eventos, duração média,	

severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG)..... 97

Figura F15 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 3 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG). 98

Figura F15 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 12 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG). 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicações e fenômenos refletidos de acordo com a escala de tempo dos índices de secas.....	32
Tabela 2 - Relação de Trabalhos que analisaram eventos de secas no Brasil.	33
Tabela 3 - Processos da propagação de secas por tipo de seca hidrológica	37
Tabela 4 – Relação de Trabalhos que analisam a propagação de secas.	38
Tabela 5 - Categoria dos eventos de secas	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	25
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	28
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1.	SECAS.....	29
2.2.	SECAS NO BRASIL.....	32
2.3.	PROPAGAÇÃO DE SECAS.....	33
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	39
3.2.	DADOS.....	40
3.3.	ÍNDICES DE SECAS.....	41
3.4.	CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECAS.....	42
3.5.	ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	43
3.6.	PROPAGAÇÃO DE SECAS.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1.	ÍNDICES DE SECAS.....	49
4.2.	CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECA.....	52
4.3.	TEMPO DE RECUPERAÇÃO.....	54
4.4.	TEMPO DE PROPAGAÇÃO.....	55
4.5.	PRINCIPAIS CONTROLES NOS EVENTOS DE SECAS.....	58
5.	CONCLUSÕES	67
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXO A – SÉRIES DE SPEI E SSI PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES	79
	ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DAS SECAS PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESE	83

ANEXO C – TEMPO DE RECUPERAÇÃO DAS SECAS PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES	85
ANEXO D – TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES	87
ANEXO F – RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECA, DO TEMPO DE RECUPERAÇÃO E DOS INDICADORES DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES	89

1. INTRODUÇÃO

Os eventos de secas podem ser definidos como o período no qual a disponibilidade hídrica natural se encontra abaixo da média e não é capaz de atender as demandas humanas e ambientais (WILHITE; PULWARTY, 2018). Esses eventos podem ocasionar desastres naturais associados a grandes perdas econômicas e danos ao meio ambiente (WILHITE, 2000). Entre 1970 e 2012, os eventos de secas foram responsáveis por aproximadamente um terço das mortes relacionadas a desastres naturais e por uma perda econômica de 200 bilhões de dólares (WMO, 2014). As secas ameaçam a produção de alimentos (BRÁS et al., 2019), a geração de energia, o abastecimento de água (MELO et al., 2016), intensificam os incêndios florestais (TAUFIK et al., 2017) e a mortalidade das árvores (DOUGHTY et al., 2015). É possível que no futuro esses eventos sejam intensificados devido às mudanças no clima (TRENBERTH et al., 2014), no uso da terra (AGHAKOUCHAK et al., 2021) e com o aumento do consumo de água (BEST, 2019). Portanto, a caracterização, monitoramento e previsão dos eventos de secas são fundamentais para aprimorar não só a gestão dos recursos hídricos, mas também a gestão ambiental e o planejamento econômico do país.

As secas são normalmente classificadas em quatro categorias (WILHITE; GLANTZ, 1985): (i) seca meteorológica, quando há anomalias negativas na precipitação; (ii) seca agrícola, relacionada a uma diminuição da umidade do solo; (iii) seca hidrológica, quando há deficiência nas vazões; (iv) seca socioeconômica, referente às demandas da sociedade. Uma seca meteorológica pode originar uma seca hidrológica quando anomalias negativas na precipitação propagam-se através do ciclo hidrológico. Esse processo é chamado de propagação de secas (ELTAHIR; YEH, 1999) e depende das características climáticas, físicas e geográficas de cada região, bem como das alterações antrópicas (WU et al., 2021). Em regiões sem influências antrópicas, a propagação de secas depende das condições climáticas e das características das bacias hidrográficas (VAN LOON, 2015; VAN LANEN et al., 2013). Alterações antrópicas, como mudança no uso da terra, construção de barragens, projetos de irrigações e a urbanização podem alterar significativamente os processos hidrológicos (e.g., evaporação e infiltração) e consequentemente afetar a propagação de secas (VAN LOON et al., 2016).

Existem diversos índices utilizados para caracterizar as secas e o emprego desses índices está relacionado ao tipo de seca e ao impacto que se deseja analisar. Por exemplo, a *World Meteorological Organization* (WMO) recomenda a utilização do índice de precipitação padro-

nizado (*standardized precipitation index* – SPI, MCKEE et al., 1993) na análise e no monitoramento de secas meteorológicas (HAYES et al., 2011). O índice de umidade do solo padronizado é utilizado na análise das secas agrícolas (*standardized soil moisture index* – SSMI, HAO; AGHAKOUCHAK, 2013). As secas hidrológicas podem ser caracterizadas utilizando o índice de vazão padronizado (*standardized streamflow index* – SSI, SHUKLA; WOOD, 2008; VICENTE-SERRANO et al., 2012). Na análise das secas socioeconômicas, índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade são utilizados (HASHIMOTO; STEDINGER; LOUCKS, 1982). Os eventos de seca também podem estar associados a mais de um controle físico (e.g. falta de precipitação ou aumento da evapotranspiração), assim, índices multivariados foram desenvolvidos para a completa caracterização desses eventos (HAO; AGHAKOUCHAK, 2013). Um desses índices multivariados é o índice de precipitação e evapotranspiração padronizado (*standardized precipitation and evaporation index* – SPEI, VICENTE-SERRANO et al., 2010), que é utilizado para a análise de secas meteorológicas. O Índice Multivariado de Seca (MSDI) utiliza a precipitação e umidade do solo para incorporar condições de secas meteorológicas e agrícolas para uma caracterização geral das secas (HAO; AGHAKOUCHAK, 2013). Já o MSSRI (*Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index*) utiliza indicadores de confiabilidade e resiliência para a análise de secas socioeconômicas (MEHRAN; MAZDIYASNI; AGHAKOUCHAK, 2015).

Utilizando esses índices de secas, pode-se também estimar a propagação de secas e analisar as suas causas (APURV; CAI, 2020; WU et al., 2021). Barker et al. (2016) verificaram que enquanto o tempo de propagação de secas meteorológicas para hidrológicas é entre 1 e 2 meses para a maioria das bacias no Reino Unido, esse tempo pode ultrapassar 4 meses em bacias em áreas de grandes aquíferos. Zeng et al. (2015) encontraram valores semelhantes para bacia do rio Jialing na China. O uso da terra e as mudanças no clima também podem alterar o tempo de propagação de secas (Zhou et al., 2019). Alterações antrópicas como o aumento no consumo de água e da urbanização podem diminuir o tempo de propagação (Xu et al., 2019). Wu et al. (2018a) verificou que áreas de florestas apresentaram propagação mais lenta, já as pastagens uma propagação mais rápida. Wu et al. (2020) desenvolveram um método para análise da recuperação de secas hidrológicas sobre a perspectiva de propagação de secas para estimar o quanto de água é necessário para recuperar uma seca hidrológica.

A ausência de uma metodologia padrão para a análise da propagação de secas e o conhecimento limitado acerca de como secas meteorológicas transformam-se em secas hidrológicas dificultam a análise, monitoramento e o desenvolvimento de sistemas de alerta (BARKER

et al., 2016). Existem diversas lacunas de conhecimento a respeito dos eventos de secas e da propagação de secas. Por exemplo, não se compreende completamente como esses eventos surgem, se desenvolvem, persistem e terminam (TALLAKSEN; VAN LANEN, 2004; VAN LOON et al., 2014; WOOD et al., 2015). Além disso, pouco se sabe sobre como as secas meteorológicas afetam o ciclo hidrológico e como as alterações antrópicas impactam esses eventos (GEVAERT; VELDKAMP; WARD, 2018; VAN LOON et al., 2016).

O Brasil é particularmente vulnerável aos eventos de secas, já que aproximadamente 32% de sua água é usada para agricultura e 70% de sua energia vem das hidrelétricas (GETIRANA, 2016; MELO et al., 2016). Nos últimos dez anos, secas mais severas e intensas ocorreram na maioria das regiões do Brasil, inclusive com secas plurianuais (CUNHA et al., 2019). Em 2010, a Amazônia enfrentou uma de suas piores secas, considerada ainda mais severa do que a seca de 2005 (MARENGO et al., 2011). A seca de 2013 no Nordeste foi considerada uma das mais severas nos últimos 100 anos, afetando a agricultura e a pecuária (GUTIÉRREZ et al., 2014). Já a seca de 2014 no Sudeste comprometeu o abastecimento de água de 28 milhões de pessoas (MELO et al., 2016). A seca de 2019 no Pantanal aumentou o risco de incêndio na região e como consequência a região foi devastada por incêndios florestais, mesmo estando na estação chuvosa (MARENGO et al., 2021). Ainda, de acordo com o IPCC (2013, 2014) as mudanças no clima intensificarão o eventos de secas e consequentemente aumentará a ameaça sobre segurança alimentar, a geração de energia elétrica e o abastecimento de água (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; RODRIGUES et al., 2020; PAREDES-TREJO et al., 2021). Os impactos de tais mudanças na disponibilidade de água superficial e como as secas meteorológicas se propagam para as secas hidrológicas no Brasil ainda não são claros. O Brasil é um país com diferentes regimes climáticos, biomas e com regiões com grande alterações antrópicas, portanto, é possível analisar como essas características influenciam o desenvolvimento e propagação de eventos de seca.

Este trabalho identifica e caracteriza os eventos de secas meteorológicas e hidrológicas no Brasil através da análise de séries históricas de 457 bacias hidrográficas distribuídas por todo Brasil para o período de 1980 a 2015. O trabalho também analisa a tendência na magnitude dos índices de secas e quantifica a propagação de secas meteorológicas para hidrológicas através de cinco indicadores do tempo de propagação. Além disso, o trabalho analisa se existe alguma relação das características dos eventos de secas e do tempo de propagação com alguns indicadores climáticos, hidrológicos, fisográficos e de alterações antrópicas.

1.1. OBJETIVO GERAL

Analisar os padrões de propagação de eventos de secas meteorológicas para hidrológicas no Brasil.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Identificar e quantificar as características das secas meteorológicas e hidrológicas.
 - Hipótese: É possível estabelecer uma relação entre as características das secas meteorológicas e hidrológicas.
- II. Calcular o tempo de propagação das secas meteorológicas para secas hidrológicas.
 - Hipótese: O tempo de propagação das secas depende do índice escolhido para o cálculo do mesmo.
- III. Analisar a influência da precipitação média anual, do índice de aridez, do índice de escoamento de base, da área da bacia e do grau de regularização nas características e na propagação dos eventos de seca.
 - Hipótese: A precipitação média anual, o índice de aridez, o índice de escoamento de base, a área da bacia e o grau de regularização influenciam nas características e no tempo de propagação dos eventos de seca.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

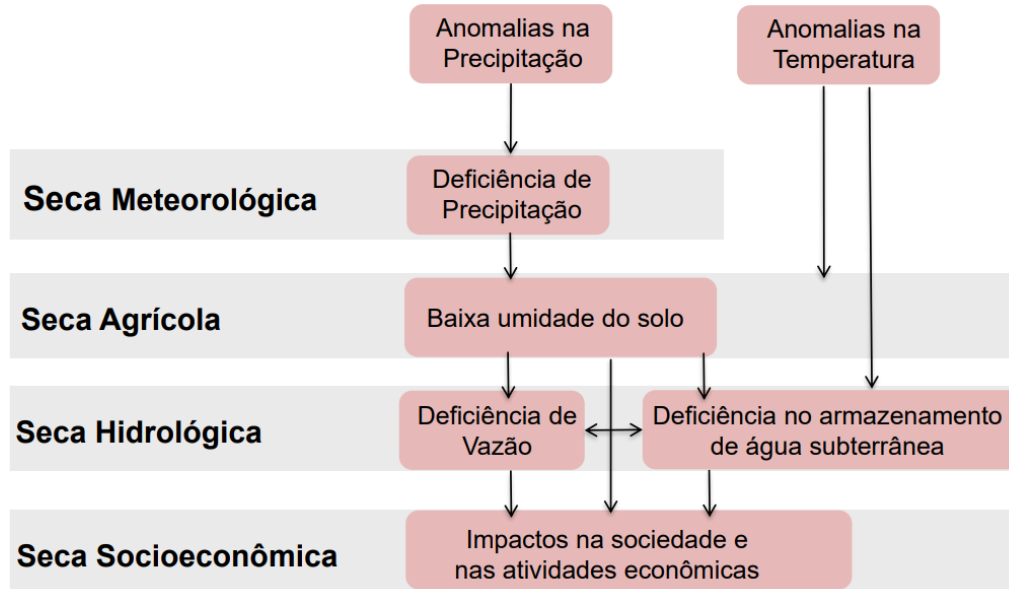
2.1. SECAS

Os eventos de secas são considerados por muitos um dos desastres naturais mais complexos e menos compreendidos dentre todos os desastres naturais. Além disso, afetam mais pessoas do que qualquer outro tipo de desastre natural (ELKOLLALY; KHADR; ZEIDAN, 2018). Os eventos de secas não possuem uma definição precisa. De acordo com Mishra e Singh (2010), um dos obstáculos para uma definição precisa desses eventos é a diferença nas variáveis hidrometeorológicas, nos fatores socioeconômicos bem como da natureza estocástica das demandas de água em diferentes regiões do mundo. Yevjevich (1967) afirma que a falta de uma definição precisa e objetiva das secas é um obstáculo no estudo desses eventos. Wilhite e Glantz (1985) analisaram mais de 150 definições de eventos de secas em seu estudo de classificação. De forma geral, Tallaksen e Van Lanen (2004) definem os eventos de secas como sendo o período no qual a disponibilidade hídrica fica abaixo da média. Já, Hayes et al. (2011) definem as secas como sendo um fenômeno natural, lento e capaz de afetar diferentes regiões climáticas, geralmente ocasionado por anomalias na precipitação.

Geralmente os eventos de secas são classificados em quatro categorias. As secas meteorológicas geralmente são definidas com base no grau de secura e na duração do período seco (WILHITE; GLANTZ, 1985). Também podem ser definidas com relação às anomalias na precipitação possivelmente associadas a um aumento na evapotranspiração potencial (VAN LOON, 2015). Os outros tipos de secas surgem conforme as anomalias negativas na precipitação se propagam pelo ciclo hidrológico. A Figura 1 apresenta a classificação dos eventos de secas em suas quatro categorias bem como os seus desenvolvimentos. A seca agrícola está relacionada a uma redução da umidade do solo que causa uma redução na umidade para a vegetação, esses eventos estão fortemente associados a prejuízos nas colheitas (VAN LOON, 2015). A redução na umidade do solo está relacionada a diversos fatores que também afetam as secas meteorológicas e hidrológicas juntamente com a diferença entre a evapotranspiração e a evapotranspiração potencial, e a demanda hídrica das plantas (MISHRA; SINGH, 2010). As secas hidrológicas referem-se à falta de água no sistema hidrológico, como baixa vazão nos rios e baixo nível nos lagos, reservatórios e águas subterrâneas (TALLAKSEN; VAN LANEN, 2004). Geralmente as secas subterrâneas são definidas separadamente das secas hidrológicas, como baixo nível no sistema de água subterrânea. As secas socioeconômicas ocorrem devido

aos impactos dos outros três tipos de secas, referem-se a uma falha do sistema de recursos hídricos em atender a demanda hídrica (VAN LOON, 2015).

Figura 1 - Classificação dos eventos de secas



Fonte: Adaptado de Van Loon (2015)

É difícil determinar quando um evento de seca se inicia e quando termina, já que os efeitos de uma seca se acumulam ao longo do tempo e seus impactos podem persistir por anos, mesmo após o fim do evento (WILHITE, 2000). Geralmente é necessário um grande período sem precipitação para que os eventos de secas se tornem perceptíveis e seus efeitos possam ser notados na vazão e no nível dos reservatórios (CUNHA et al., 2019). Além disso, de acordo com Cunha et al. (2019), os impactos dos eventos de seca dependem da vulnerabilidade da sociedade naquele dado momento. Dessa forma, secas subsequentes com as mesmas características poderão ter efeitos diferentes na mesma região. Os índices de secas foram desenvolvidos para identificar e caracterizar os eventos de secas de forma objetiva e que possibilitassem a comparação dos eventos em diferentes regiões e regimes climáticos (STAGGE et al., 2015). Heim (2002) afirma que a subjetividade na definição dos eventos de secas dificultou o estabelecimento de um índice único e universal na análise desses eventos. No entanto, segundo Van Loon (2015), a análise dos eventos de secas deve ser feita utilizando diferentes índices para que seja possível avaliar os diferentes impactos desses eventos. Ainda, geralmente cada índice está relacionado a uma parte específica do ciclo hidrológico, portanto a escolha desses índices é feita com base no tipo de evento e impacto que se pretende analisar.

Os índices padronizados de secas são comumente utilizados na identificação, caracterização e no monitoramento dos eventos de secas. A padronização dos índices permite que diferentes tipos de climas (e.g., úmido, seco) sejam comparados, além disso os índices padronizados são vantajosos devido à facilidade de aplicação (MISHRA; SINGH, 2010). Contudo, necessitam de longas séries de dados observados, Guttman (1999) recomenda séries de dados com pelos 50 anos, enquanto que Mckee et al. (1993) sugerem no mínimo 30 anos de dados. O Índice de Precipitação Padronizado (SPI) desenvolvido por Mckee et al. (1993) é um dos índices mais utilizados na análise dos eventos de secas, mede anomalias normalizadas na precipitação. É recomendado pela Declaração de Lincoln sobre Índices de Secas (HAYES et al., 2011) como indicador de secas meteorológicas. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no Brasil, utiliza o SPI no monitoramento de secas meteorológicas no país (<http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>). Contudo, uma das maiores desvantagens do SPI é seu cálculo apenas com dados de precipitação, o índice não considera outras variáveis que também afetam a secas meteorológicas como a temperatura e a evapotranspiração (VICENTE-SERRANO et al., 2010).

Vicente-Serrano et al. (2010a) propuseram o Índice de Precipitação e Evapotranspiração potencial (SPEI) que possui a mesma simplicidade do SPI, no entanto possui a vantagem de levar em consideração os efeitos da temperatura através da evapotranspiração potencial (VICENTE-SERRANO et al., 2010b). Devido às vantagens do SPEI em relação ao SSI, neste trabalho foi selecionado o SPEI como indicador de secas meteorológicas. Como indicador de secas hidrológicas foi selecionado o Índice de Vazão Padronizado (SSI; SHUKLA; WOOD, 2008; VICENTE-SERRANO et al., 2012) que é amplamente usado na análise das secas hidrológicas. Os índices de secas são geralmente calculados para várias escalas de tempo, já que ao longo do tempo o déficit na precipitação afeta de forma gradual e variável diferentes recursos hídricos (ZARGAR et al., 2011). A Tabela 1 apresenta as escalas de tempo, os fenômenos refletidos e suas aplicações. Neste trabalho, foram analisadas principalmente as escalas de 3, 6 e 12 meses.

Tabela 1 – Aplicações e fenômenos refletidos de acordo com a escala de tempo dos índices de secas.

Escala de Tempo	Fenômeno Refletido	Aplicação
1 mês	Condições de curto prazo	Alterações de curto prazo na umidade do solo e agricultura.
3 meses	Condições de umidade de curto e médio prazo	Estimativa sazonal da precipitação
6 meses	Condições de médio prazo	Estimativa da precipitação ao longo das estações do ano
9 meses	Padrões de precipitação em escala de tempo médio	Bom indicador para impactos significativos na agricultura
12 meses	Padrões de longo prazo na precipitação	Associado a impactos na vazão e nos níveis de reservatórios e água subterrânea.

Fonte: Adaptado de Zargar et al. (2011)

2.2. SECAS NO BRASIL

No Brasil, modos de variabilidade climática como o *El Niño* - Oscilação Sul (ENSO), são responsáveis por eventos de secas em diferentes regiões do País. Secas na região Norte e Nordeste do Brasil estão frequentemente relacionadas aos eventos de *El Niño* (fase positiva do ENSO), enquanto na região Sul os eventos de *La Niña* (fase negativa do ENSO) estão geralmente associados a intensificação dos períodos de seca (GUTIÉRREZ et al., 2014). Contudo, as fases do ENSO também podem afetar regiões de forma diferente do que normalmente esperado. Por exemplo, os eventos de *La Niña* geralmente são responsáveis por precipitações acima da média na região Nordeste, no entanto a *La Niña* de 2011-2012 pode ter desencadeado uma das piores secas na região (RODRIGUES; MCPHADEN, 2014). Outros fatores também são responsáveis pelos eventos de secas no Brasil. No Norte e Nordeste, anomalias na temperatura do oceano Atlântico também ocasionam eventos de secas (MARENGO; ESPINOZA, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Já no Sul, bloqueios atmosféricos e as oscilações de Madden-Julian também estão relacionados a esses eventos (RODRIGUES; WOOLLINGS, 2017).

As alterações antrópicas também são responsáveis por intensificar os eventos de secas. De acordo com Bagley et al. (2014), alterações como o desmatamento, que ocasiona mudanças

na cobertura do solo, são capazes de intensificar a severidade dos eventos de secas na região da Amazônia e consequentemente diminuir a vazão dos rios. Além disso, as projeções climáticas indicam que para região Nordeste e para parte da Amazônia haverá uma redução na precipitação e consequentemente um aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas nessas regiões (MARENGO; ESPINOZA, 2016; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

A Tabela 2 apresenta uma relação de trabalhos que analisaram eventos de secas no Brasil. Dentre os artigos analisados, a maioria deles analisou eventos de seca em somente uma região do Brasil (e.g., MORALES et al., 2020; BRASIL NETO et al., 2021; PAREDES-TREJO et al., 2021; LOPES et al., 2016; BRITO et al., 2018; MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Cunha et al. (2019) afirmaram que, devido a extensão territorial do Brasil e sua heterogeneidade regional, é necessário que sejam desenvolvidos métodos precisos para a análise em larga escala dos eventos de secas. Ainda segundo Cunha et al. (2019), os impactos dos eventos de secas em diferentes setores como economia e o meio ambiente podem ser mais intensos dependendo da região do Brasil.

Tabela 2 - Relação de Trabalhos que analisaram eventos de secas no Brasil.

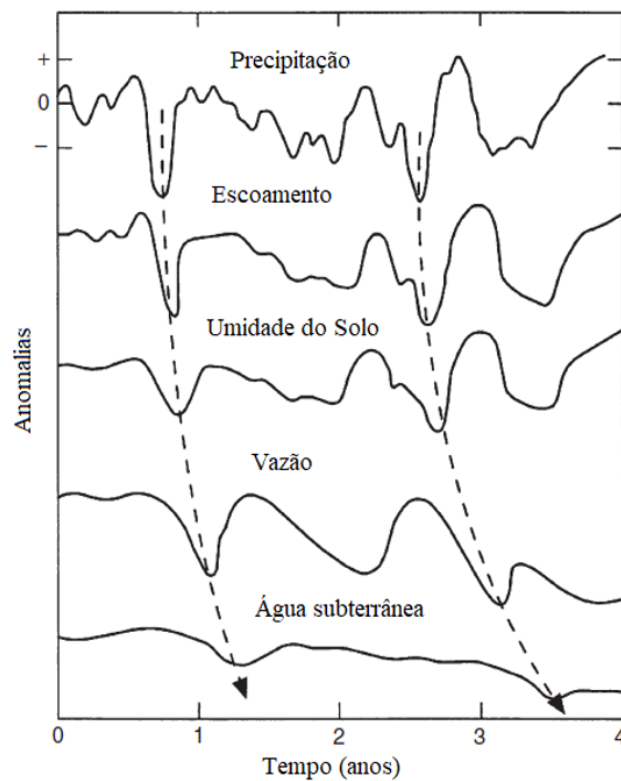
Referência	Área de estudo	Período de Análise	Método
Awange, Mpelasoka e Goncalves (2016)	Brasil	1901 - 2013	SPI, SRI
Brasil Neto et al. (2021)	Paraíba	1998 - 2017	SPI, Theil-Sen, Mann-Kendall
Brito et al. (2018)	Nordeste	1981 - 2016	SPI, VHI,
Cunha et al. (2019)	Brasil	2011 - 2019	VHI, SPI, IDI
Lopes et al. (2016)	Amazônia	1975 - 2013	PPCA, Monte Carlo, Índice Niño 3.4, Mann-Kendall
Morales et al. (2020)	Parte Sul da América do Sul	1951 - 2000 1400 - 2000	scPDSI
Paredes-Trejo et al. (2021)	Amazônia	1901 - 2018	SPEI, Mann-Kendall, Theil-Sen

2.3. PROPAGAÇÃO DE SECAS

Geralmente um evento de seca meteorológica dá origem a um evento de seca hidrológica. Contudo, as secas hidrológicas são um fenômeno complexo uma vez que os eventos de secas hidrológicas dependem de vários fatores hidrológicos, além dos fatores atmosféricos (MISHRA; SINGH, 2010; VAN LOON, 2015). Processos atmosféricos como anomalias negativas na precipitação (Figura 2) são uns dos pontos de partida dos eventos de secas hidrológicas,

déficits prolongados afetam a quantidade de entrada no ciclo hidrológico (VAN LOON, 2015). Anomalias na temperatura também são responsáveis por desencadear esses eventos, já que a temperatura também é um dos principais fatores atmosféricos responsáveis pelo balanço hídrico e por déficits nas bacias hidrográficas (TIJDEMAN et al., 2018). Como citado anteriormente (seção 2.2), a causa das anomalias na precipitação e na temperatura estão geralmente associadas a padrões atmosféricos e oceânicos de larga escala (GUTIÉRREZ et al., 2014; MARENGO; ESPINOZA, 2016; RODRIGUES; WOOLLINGS, 2017).

Figura 2 - Propagação das anomalias na precipitação através da parte terrestre ciclo hidrológico para uma série sintética. A média é representado por 0, anomalia positivas por + e anomalias negativas por -.



Fonte: Adaptado de Van Loon (2015)

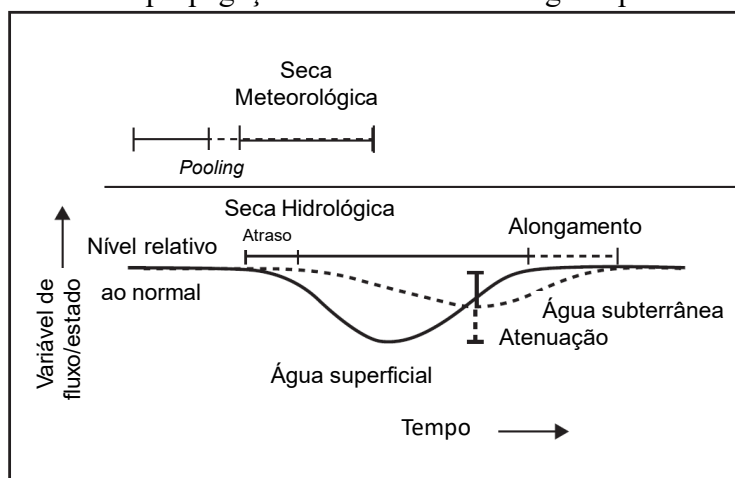
A redução na umidade do solo leva a uma diminuição na recarga do sistema de águas subterrâneas o que, por sua vez, ocasiona uma redução nos níveis de água subterrânea. Como esse sistema responde de forma atenuada aos processos atmosféricos, nem sempre essas anomalias ocasionarão uma seca no sistema subterrâneo, no entanto podem ocasionar reduções nos níveis de vazão. Essa cadeia de processos é descrita por Van Loon (2015) como propagação de secas e que consiste na mudança do sinal de seca conforme se propaga pela parte terrestre do ciclo hidrológico (Figura 2). Contudo, como a propagação de secas depende de vários fatores,

como condições climáticas, características físicas e influências antrópicas nas bacias hidrográficas, nem sempre uma seca meteorológica dará origem a uma seca hidrológica (TIJDEMAN et al., 2018).

A propagação de secas pode ser descrita por quatro características que são representadas na Figura 3 e estão apresentadas abaixo (PETERS et al., 2003; VAN LOON, 2015):

1. *Pooling*: secas meteorológicas são combinadas em uma seca hidrológica prolongada;
2. Atenuação: secas meteorológicas são atenuadas no armazenamento acarretando uma suavização nas anomalias negativas;
3. Atraso: ocorre entre as secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas. O início da seca ocorre mais tarde.
4. Alongamento: as secas duram mais tempo quando uma seca meteorológica se propaga através de uma seca agrícola para uma seca hidrológica.

Figura 3 – Características da propagação de secas meteorológicas para secas hidrológicas.



Fonte: Adaptado de Hisdal; Tallaksen (2000) e Van Loon (2015)

Essas características dependem das propriedades das bacias hidrográficas. A atenuação e o atraso estão regidas pelos controles das bacias, enquanto o pooling e o alongamento dependem dos fatores climáticos (VAN LOON, 2013). Van Loon (2015) detalha como os controles climáticos descritos na Tabela 3 de acordo com o tipo de seca hidrológica influenciam esses eventos. Ainda segundo Van Loon (2015), os eventos de secas hidrológicas se desenvolvem de formas diferentes, dependendo das condições do clima (com ou sem sazonalidade). Em climas com baixa sazonalidade (constantemente), a principal causa para desenvolvimento de secas hidrológicas são as anomalias na precipitação, podendo estar associadas a um aumento na evapotrans-

piração potencial. Já em climas com alta sazonalidade, outros processos também são responsáveis pelo desenvolvimento de secas de verão ou de inverno. Por exemplo, em climas quentes sazonais a recarga acontece na estação úmida, portanto uma seca nessa estação afeta os níveis de armazenamento na bacia e conseqüentemente a estação seca. Já em climas áridos, os períodos de seca são irregulares e a vazão é altamente influenciada pelas vazões de água subterrânea.

Além do clima, os controles das bacias hidrográficas também são importantes no desenvolvimento e na propagação das secas hidrológicas (VAN LOON; VAN LANEN, 2012). Portanto, devido às características das bacias hidrográficas, secas meteorológicas que possuem características similares, tais como intensidade e severidade, podem-se propagar de maneira diferente em diferentes regiões e conseqüentemente causar impactos diferentes (APURV; SIVAPALAN; CAI, 2017). Características como lagos, aquíferos, banhados podem atrasar a propagação de secas, pois funcionam como reservatórios. Além disso, Tjrdeman et al. (2018) afirma que bacias com alterações antrópicas, é questionável se as condições climáticas continuam como processo dominante na propagação de secas.

Compreender os processos envolvendo a propagação de secas é fundamental para melhorar o monitoramento e gerenciamento desses eventos (BARKER et al., 2016). A Tabela 4 apresenta uma relação de trabalhos que analisaram a propagação entre eventos de secas. Dentre esses artigos, diversos estudos buscaram aumentar o conhecimento acerca da propagação de secas meteorológicas para hidrológicas (e.g. HUANG et al., 2017; BAE et al., 2019; WANG et al., 2019; LI et al., 2020; GU et al., 2020; YU; LIU; LI, 2020; XU et al., 2019). Ainda existe uma falta de estudos que analisem a propagação para secas agrícolas e subterrâneas (CHEN et al., 2020; HAN et al., 2019). Chen et al. (2020) ainda afirmaram que só será possível compreender completamente a propagação de secas quando a cadeia completa de propagação for estudada, isto é a propagação no sistemas “atmosfera-hidrologia-solo-vegetação.

Tabela 3 - Processos da propagação de secas por tipo de seca hidrológica

Tipo de seca hidrológica	Processos dominantes	Desenvolvimento	(Falta de) Recuperação
Seca clássica, déficit na precipitação	Déficit de precipitação (em qualquer estação)	Precipitação	Precipitação
Seca da estação chuvosa para estação de neve	Déficit de precipitação na estação chuvosa, seca continua na estação de neve	Precipitação	Temperatura
Seca da estação úmida para estação seca	Déficit na estação úmida, seca continua na estação seca	Precipitação	Precipitação e temperatura
Seca da estação de neve fria	Temperatura baixa na estação de neve que leva a:		
Subtipo A	Começo cedo da estação de neve	Temperatura	Temperatura
Subtipo B	Atraso no derretimento da neve	Temperatura	Temperatura
Subtipo C	Falta de recarga	Temperatura	Temperatura
Seca da estação de neve quente	Altas temperaturas na estação de neve que leva a:		
Subtipo A	Antecipação do derretimento da neve	Temperatura	Precipitação
Subtipo B	Combinado com déficit na precipitação, sem recarga	Precipitação e temperatura	Precipitação
Seca do derretimento da neve	Falta de derretimento da neve na primavera devido à baixa precipitação ou altas Temperaturas no inverno	Precipitação e/ou temperatura	Precipitação
Seca do degelo de geleiras	Falta do degelo de geleiras devido a baixas temperaturas no inverno	Temperatura	Precipitação ou temperatura
Seca composta	Combinação de vários eventos ao longo de várias estações	Precipitação e/ou temperatura	Precipitação

Fonte: Adaptado de Van Loon (2015)

Tabela 4 – Relação de Trabalhos que analisam a propagação de secas.

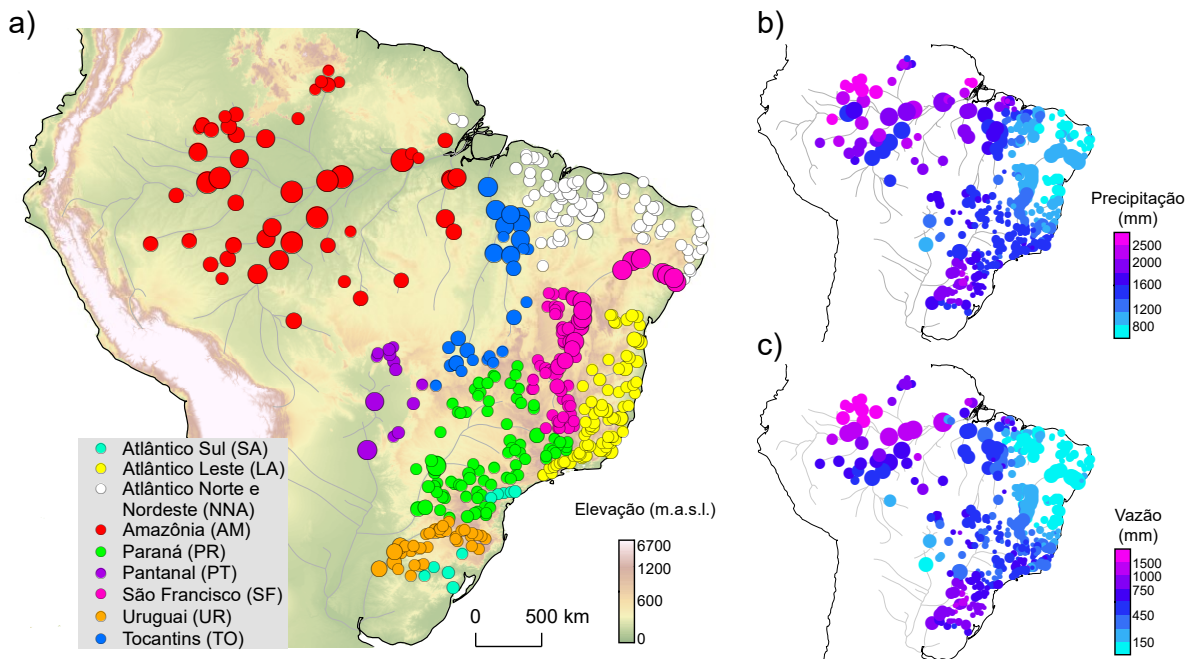
Referência	Área de estudo	Período de Análise	Método
Bae et al. (2019)	Coreia do Sul	1973 - 2015 1998 -2015	SPI, PCA
Chen et al. (2020)	Planície do Norte da China	1981 - 2018	SPI, SRI, SSI, modelos lineares e não lineares
Gu et al. (2020)	China	1961 - 2014	SPEI, SRI
Han et al. (2019)	Bacia do Rio Pearl, China	2002 - 2015 1979 - 2015	NDVI, ENSO, PDO, AO, SPI, CWT
Huang et al. (2017)	Bacia do Rio Wei, China	1960 - 2008	SPI, SSI, ENSO, <i>Cross wavelet analysis</i> , Budyko
Li et al. (2020)	Bacia do Rio Shaying, China	1964 - 2016	SPI, SSI, correlação de Pearson
Wang et al. (2019)	Bacia do rio Luanhe, China.	1963 - 2012	SWAT, VTL
WU et al. (2018a)	China, Estados Unidos e Alemanha	1960 - 2006 1958 - 2016 1957 -2012	SSI
Wu et al. (2020)	China	1960 - 2006 1960 - 2010	HAI, MAI
Xu et al. (2019)	Bacia do Rio Luanhe, China.	1960 - 2016	SPI, SRI, Correlação de Spearman
Yu et al. (2019)	Bacia do Rio Huaihe, China	1964 - 2006	SPI, SSI, Correlação de Pearson, <i>Wavelet coherence</i> , Regressão linear, modelos não lineares

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho foram analisadas 457 bacias hidrográficas distribuídas por todo o território brasileiro. A Figura 4 (a) apresenta as estações fluviométricas utilizadas como exutória na delimitação das bacias hidrográficas. As bacias hidrográficas estão classificadas de acordo com as regiões hidrográficas definidas pela Agência Nacional de Águas (ANA). A maioria das bacias estão localizadas na região do Rio Paraná (19%), seguidas do Atlântico leste e Atlântico Norte e Nordeste com 18% cada. O tamanho das bacias varia significativamente, 51% das bacias possuem uma área entre 1.500 km² e 10.000 km². Mais de 35% das bacias têm entre 10.000 km² e 100.000 km². O restante da bacia (14%) possui áreas maiores que 100.000 km². As maiores bacias estão localizadas na região Amazônica, seguida pela região do São Francisco e Tocantins.

Figura 4 - (a) Localização das 457 estações fluviométricas classificadas de acordo com suas regiões hidrográficas. (b) Precipitação e (c) vazão média anual. O tamanho dos marcadores varia proporcionalmente à área das bacias hidrográficas.



O Brasil é um país de escala continental e por isso apresenta diferentes regimes climáticos. A Figura 4 (b) e (c) apresentam as precipitações e vazões médias anuais para todas as bacias hidrográficas analisadas. A região Amazônica é a região mais úmida do país com precipitações maiores que 2000 mm por ano e vazões superiores a 1000 mm por ano. Já a região Nordeste é a região mais seca do Brasil, com precipitações variando entre 600 mm e 1200 mm por ano e com vazões inferiores a 300 mm por ano.

3.2. DADOS

Foram utilizadas duas bases de dados diferentes para precipitação. Para as bacias hidrográficas que se encontram totalmente dentro do território brasileiro, utilizou-se *grids* diários de precipitação de Xavier et al. (2016). Para as bacias hidrográficas que possuem alguma parte fora do Brasil, foram utilizados *grids* diários do *Climate Prediction Center* (CPC, 2018). Os dados de Xavier et al. (2016) possuem uma resolução de 0,25° enquanto os dados do CPC possuem uma resolução de 0,50°. Para que a resolução dos dados estivesse de acordo, os dados do CPC foram reinterpolados para uma resolução de 0,25°, para isso os pixels foram divididos em quatro partes. O período de análise foi determinado com base na disponibilidade dos dados de Xavier et al. (2016), que vai desde 01 de janeiro de 1980 até 31 de dezembro de 2015.

Os dados diários de evapotranspiração potencial (PET) foram obtidos do Global Land Evaporation Amsterdam Model v3.3a (GLEAM, MARTENS et al., 2017; MIRALLES et al., 2011). Os dados do GLEAM possuem a mesma resolução espacial de 0,25° e o mesmo período de análise. As séries diárias de precipitação e da PET foram obtidas através da média dos pixels de cada *grid* diário resultando na precipitação média diária. Foram considerados somente os pixels no qual o centroide encontra-se dentro da bacia. Por fim, a precipitação e a PET mensal foram obtidos através da soma das médias diárias.

Os dados diários de vazão foram obtidos do CAMELS-BR (CHAGAS et al., 2020), que utiliza os dados das estações fluviométricas da ANA. Os dados diários de vazão foram convertidos em dados mensais e somente estações com menos de 30% de falhas nos dados no período analisado foram selecionadas. Ainda, foi realizada uma análise exploratória visual dos dados de vazão a fim de eliminar estações que tivessem dados discrepantes. As bacias hidrográficas foram delimitadas utilizando o modelo digital de elevação do SRMT (*Shuttle Radar Topographic Mission*; USGS, 2006). Devido a resolução espacial dos dados meteorológicos, somente bacias com áreas maiores que 1.500 km² foram selecionadas.

Para a análise dos controles sobre os eventos de seca foram utilizados, o índice de aridez como indicador climático, o índice de escoamento de base como indicador hidrológico e o grau de regularização das bacias com indicador da influência antrópica. Os dados foram obtidos da base de dados do CAMELS-BR (CHAGAS et al., 2020). O índice de aridez foi calculado por Chagas et al. (2020) através da relação entre a evapotranspiração potencial média e precipitação média da bacia (BUDYKO, 1974), utilizando os dados de evapotranspiração potencial do GLEAM v3.3a (MARTENS et al., 2017; MIRALLES et al., 2011) e os dados de precipitação

do CHIPRS v2.0 (Funk et al., 2015). O índice de escoamento de base é a razão entre o escoamento de base de longo termo e vazão de longo termo. Para obter o índice de escoamento de base Chagas et al. (2020) utilizou o filtro de Ladson et al. (2013) para separar o escoamento de base do hidrograma, os dados de vazão utilizados foram da ANA. O índice de escoamento de base foi escolhido pois está relacionado com outras características das bacias, como a profundidade do solo. Já o grau de regularização (%) é a relação da capacidade total de todos os reservatórios da bacia pela vazão total anual da bacia (CAMELS-BR, CHAGAS et al., 2020).

3.3. ÍNDICES DE SECAS

Como indicador de seca meteorológica, foi utilizado o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI). O SPEI foi proposto por Vicente-Serrano et al. (2010a) como uma alternativa para o SPI, com a vantagem de levar em consideração os efeitos da evapotranspiração potencial. Já para as secas hidrológicas, foi selecionado o Índice de Vazão Padronizado (SSI) (SHUKLA; WOOD, 2008; VICENTE-SERRANO et al., 2012). O cálculo de ambos os índices segue o mesmo princípio. Primeiro é realizada a soma móvel da variável de entrada para diferentes períodos de acumulação (e.g., 1, 3, 6, 12 meses ou mais). Em seguida, as somas móveis são ajustadas à distribuição escolhida. Para que os efeitos da sazonalidade sejam considerados, o ajuste das somas móveis deve ser realizado mês a mês. Primeiro todos os meses de janeiro, depois todos os meses de fevereiro e assim por diante. Por fim, o índice de seca é obtido através da transformação da distribuição para uma distribuição normal. O SPEI utiliza como variável de entrada um balanço hídrico simplificado através da diferença entre a precipitação e PET. Já o SSI utiliza somente a vazão como variável de entrada. Seguindo as recomendações da literatura (STAGGE et al., 2015; VICENTE-SERRANO et al., 2012), para ambos os índices, a distribuição escolhida foi a distribuição Generalizada de Valores Extremos, *Generalized Extreme Values* (GEV), cuja função cumulativa (CDF), $F(x)$, é representada pela Equação 1 (HOSKING; WALLIS; WOOD, 1985).

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1 - \frac{k(x-\xi)}{\alpha}\right)^{1/k}\right), & k \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right)\right), & k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

em que x é a soma móvel da variável de entrada, ξ é o parâmetro de localização, α é o parâmetro de escala e k é o parâmetro de forma.

O SPEI e o SSI são então obtidos através do cálculo do quantil da distribuição normal, padrão (i.e., com média $\mu = 0$ e desvio padrão $\sigma = 1$), associado as probabilidades de não exce-
dência p , calculadas através de $F(x)$, i.e.,

$$IS = \Psi(p, \mu, \sigma) \quad (2)$$

em que Ψ é a inversa da CDF da distribuição normal, e $IS = \{SPEI, SSI\}$.

Os índices de secas foram calculados utilizando o *software* MATLAB®, os parâmetros da distribuição foram estimados usando a função `gevfit` que utiliza o método de máxima verosimilhança. A função cumulativa foi calculada através da função `gevcdf`, o SPEI e SSI foram então obtidos pela `norminv`. Neste trabalho os índices de secas foram calculados somente para as escalas de tempo de 1 a 12 meses. Os períodos de acumulação do SPEI e SSI foram denominados de SPEI-1 e SSI-1 referentes a 1 mês de acumulação, SPEI-2 e SSI-2 referentes a 2 meses de acumulação e assim sucessivamente. A Tabela 5 apresenta as categorias dos eventos de secas de acordo com o valor do índice de seca.

Tabela 5 - Categoria dos eventos de secas

Valor do Índice de Seca	Categoria da seca
0,00 a -0,99	Seca fraca
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
$\leq -2,00$	Seca extrema

Fonte: Adaptado de Mckee et al. (1993)

3.4. CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECA

Para cada bacia hidrográfica foi calculado o número de eventos de secas meteorológicas, sua duração, severidade e tempo de recuperação. O mesmo foi aplicado para os eventos de secas hidrológicas. Foi definido que um evento de seca começa quando o índice de seca atinge um valor igual ou inferior a -1 e dura até que o índice retorne a um valor igual ou superior a zero (MCKEE et al., 1993). A duração do evento de seca é definida como o período contínuo em que o índice de seca fica abaixo do limiar estabelecido até atingir um valor igual ou maior que zero. A severidade dos eventos é a soma dos valores de SPEI e SSI para cada mês durante o evento de seca. A duração e a severidade estão representadas na Figura 5 (b).

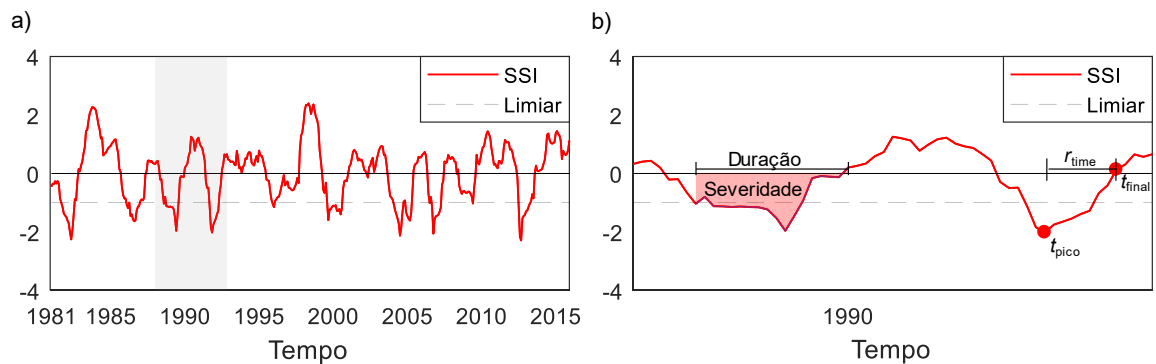
O tempo de recuperação (r_{time} , Figura 5 (b)) é definido como o tempo que leva para um evento de seca terminar uma vez que tenha atingido seu pico (WU et al., 2018b). O r_{time} é obtido através da diferença entre o tempo de pico (t_{pico}) e o tempo final (t_{final}) do evento (Equação 3). Utilizando o tempo de recuperação médio dos eventos de secas meteorológicas ($\bar{r}_{\text{time}, \text{SPEI}}$) e

hidrológicas ($\bar{r}_{\text{time,SSI}}$) foi estimada a taxa de recuperação (tx_r) de cada bacia (Equação 4), proposto por este trabalho. Isto é, quanto tempo mais uma seca hidrológica leva para recuperar em comparação a uma seca meteorológica. Para isso, foi dividido o tempo de recuperação médio do SSI ($r_{\text{time,SSI}}$) pelo tempo de recuperação médio do SPEI ($r_{\text{time,SPEI}}$). Sendo assim, este trabalho testa se em regiões mais úmidas o tempo de recuperação dos eventos de secas é mais rápido do que em regiões mais secas.

$$r_{\text{time}} = t_{\text{final}} - t_{\text{pico}} \quad (3)$$

$$tx_r = \frac{\bar{r}_{\text{time,SSI}}}{\bar{r}_{\text{time,SPEI}}} \quad (4)$$

Figura 5 – (a) Série de SSI para a escala de tempo de 12 meses, a área destacada em cinza corresponde a parte da série exibida em (b). As características dos eventos como a duração, severidade (área vermelha), tempo de pico (t_{pico}), tempo final (t_{final}) e tempo de recuperação (r_{time}) são mostrados em (b).



3.5. ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Foi realizada uma análise de tendência nas séries de SPEI e SSI. Para isso, foi utilizada a declividade de Theil-Sen (Equação 5; THEIL, 1950; SEN, 1968) para quantificar a magnitude das tendências nos índices de secas.

$$b = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \forall i < j \quad (5)$$

onde x_j e x_i são os valores da série que corresponde aos anos j e i respectivamente. Já a declividade b é o equivalente à mediana de todos os possíveis pares consecutivos de dados.

O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi utilizado para verificar se há tendências nas séries de SPEI e SSI, e se elas são significativas. O nível de confiança utilizado foi de 0,05. A aplicação do teste é descrita a seguir.

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

em que n é o comprimento da série de dados (anos, de 1980 a 2015), x_j e x_i são os valores sequenciais da série de dados.

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

Para $n \geq 10$, é esperado que S seja normalmente distribuído, com média igual a zero e variância igual a:

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

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

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

O p-valor é então retirado da tabela de distribuição normal a partir do valor $Z(MK)$. O teste, neste caso as tendências graduais, são consideradas significativas se:

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

Portanto, para um nível de significância α a hipótese nula é rejeitada. Um valor positivo de $Z(MK)$ indica que a tendência é positiva. Já um valor negativo, indica que a tendência é negativa.

3.6. PROPAGAÇÃO DE SECAS

Foram utilizados cinco indicadores para analisar o tempo de propagação entre secas meteorológicas e hidrológicas. O primeiro indicador foi seguindo Barker et al., (2016), que consistiu em comparar as séries de SPEI e SSI a fim de se ter uma estimativa do tempo que uma anomalia na precipitação leva para afetar a vazão. Para isso, as séries de SPEI-1 a SPEI-12 foram correlacionadas com as séries de SSI-1 através da correlação de Pearson (Equação 11,

GIBBONS; CHAKRABORTI, 1992). Para que a correlação cruzada não tenha valores espúrios, as séries correlacionadas devem ser estacionárias (CHATFIELD, 2016). Para atender esses critérios, a tendência linear na média foi identificada e removidas das séries de SPEI e SSI utilizando a declividade de Theil-Sen (Equação 6). O período de acumulação do SPEI que possuir maior correlação (SPEI-n) com a série de SSI-1 foi considerado o indicador do tempo de propagação.

$$r(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)(Y_{b,i} - \bar{Y}_b)}{\left(\sum_{i=1}^n (X_{a,i} - \bar{X}_a)^2 \sum_{j=1}^n (Y_{b,j} - \bar{Y}_b)^2\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

O segundo, terceiro e quarto indicadores calculados para estimar o tempo de propagação, estão representados na Figura 6 (b) e foram propostos por este trabalho. Primeiro foi calculada a diferença entre os tempos de início (Δi) das meteorológicas e hidrológicas (Equação 12). Segundo, foi calculada a diferença entre o tempo de pico (Δp) dos eventos desses eventos (Equação 13). Terceiro, foi calculado a diferença entre tempo final (Δf) desses eventos de secas (Equação 14). Por último, foi estimado a média dos Δi , Δp e Δf para cada bacia hidrográfica. Nas aplicações desses indicadores foram feitas algumas considerações. Foram somente analisados eventos de secas no qual a seca meteorológica começa antes da seca hidrológica. Foi considerado que uma seca hidrológica ocorre devido a uma seca meteorológica se o evento começar antes da seca meteorológica acabar. Essa suposição foi feita devido a dificuldade de determinar se um evento de seca hidrológica que começa depois da seca meteorológica acabar é devido a esse evento de seca meteorológica. No caso de eventos múltiplos de seca meteorológicas ocasionarem a seca hidrológica, somente o primeiro evento de seca meteorológica foi considerado para o cálculo da propagação. Também foram só analisados eventos no qual o pico e o final da seca meteorológica ocorrem antes do pico e do final da seca hidrológica.

A Figura 6 (c) mostra as séries de SPEI e SSI para uma bacia hidrográfica aleatória. As faixas cinzas e vermelhas correspondem aos eventos que atenderam aos critérios para o cálculo da propagação de secas. Em cinza são os eventos de seca hidrológica que ocorrem devido a um único evento de seca meteorológica. Em vermelho são os eventos de secas hidrológicas que ocorrem devido a eventos múltiplos de secas meteorológicas. As faixas em azul representam os eventos de seca meteorológica que não deram origem a um evento de seca hidrológica. Já em amarelo tem-se os eventos de secas hidrológicas que ocorrem sem a presença de um evento de seca meteorológico.

$$\Delta i = i_{SSI} - i_{SPEI} \quad (12)$$

$$\Delta p = p_{\text{SSI}} - p_{\text{SPEI}} \quad (13)$$

$$\Delta f = f_{\text{SSI}} - f_{\text{SPEI}} \quad (14)$$

Para o último indicador do tempo de propagação foi utilizado o centro de massa dos eventos de seca (Figura 6 (b)). O centro de massa foi calculado para os mesmos eventos que foram considerados na aplicação do Δi , Δp , e Δf seu cálculo é descrito na Equação 15 e 16.

$$c_{\text{SPEI}} = \frac{\sum_{i=mi}^{mf} t_i \text{SPEI}_i}{\sum_{i=mi}^{mf} \text{SPEI}_i} \quad (15)$$

$$c_{\text{SSI}} = \frac{\sum_{i=mi}^{mf} t_i \text{SSI}_i}{\sum_{i=mi}^{mf} \text{SSI}_i} \quad (16)$$

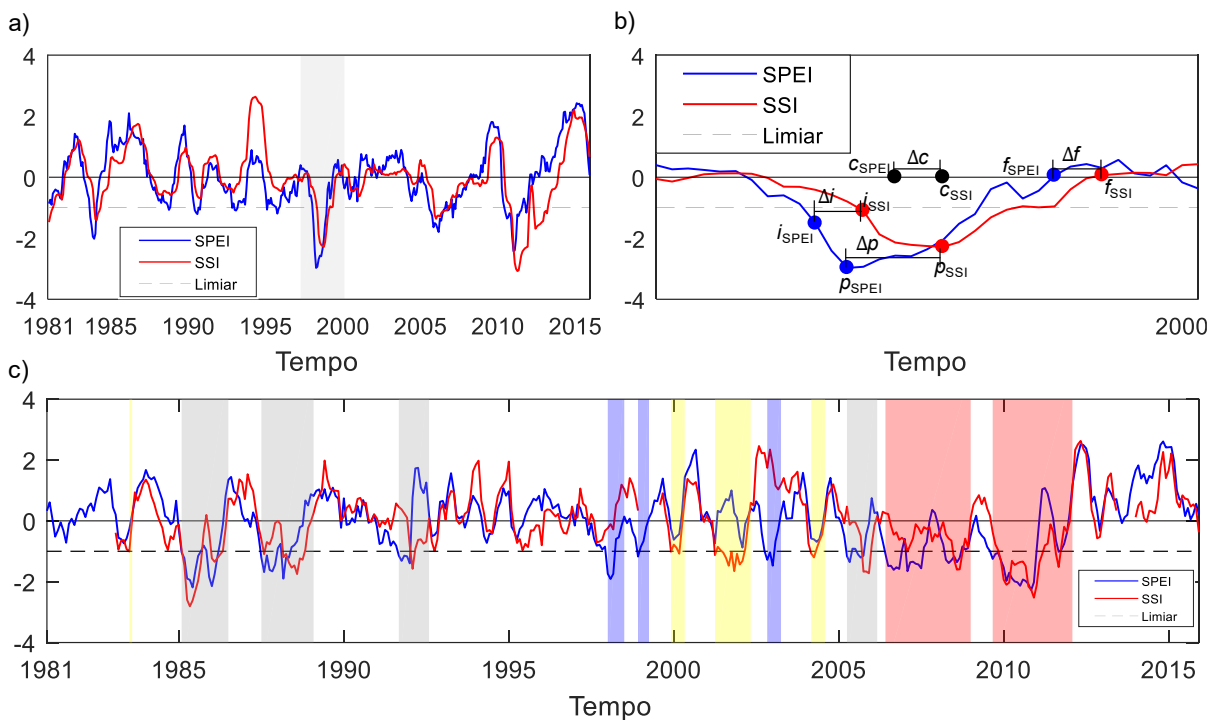
onde t_i corresponde ao tempo em meses; SPEI_i e SSI_i são os valores de SPEI e SSI para o mês i , tal que i varia do mês inicial (mi) do evento até o mês final (mf) do evento.

Em seguida foi realizada a diferença entre os centros de massas (Δc) dos eventos de seca hidrológica e meteorológica (Equação 17). O tempo de propagação para cada bacia hidrográfica foi estimado através da média de Δc .

$$\Delta c = c_{\text{SSI}} - c_{\text{SPEI}} \quad (17)$$

Por fim, este trabalho analisou se existe alguma relação entre os cinco indicadores do tempo de propagação e as características dos eventos de secas com os indicadores climáticos, fisiográficos e de alterações antrópicas das bacias. Sendo assim, este trabalho testa se regiões mais úmidas tem uma propagação mais lenta que regiões mais secas e se para bacias regularizadas e com áreas maiores o tempo de propagação é maior.

Figura 6 – (a) Série de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses, a área destacada em cinza corresponde à parte da série exibida em (b). Quatro indicadores para estimar o tempo de propagação são apresentados em (b). i_{SPEI} e i_{SSI} representam o tempo de início dos eventos de seca, sendo Δi a diferença entre eles. p_{SPEI} e p_{SSI} representam o tempo de pico das secas, sendo Δp a diferença entre os tempos de pico. f_{SPEI} e f_{SSI} representam o tempo de final dos eventos, sendo Δf a diferença entre eles. c_{SPEI} e c_{SSI} representam o centro de massa dos eventos, sendo Δc a diferença entre os centros de massa. (c) Série de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses para outra bacia hidrográfica. Faixas cinzas são os eventos de secas hidrológicas que ocorrem devido a um evento de seca meteorológica, faixas em vermelho são eventos que ocorrem devido a eventos múltiplos. Em azul são os eventos de seca meteorológica que não dão origem aos eventos hidrológicos. Em vermelho são eventos de secas hidrológicas que ocorrem sozinhos.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ÍNDICES DE SECAS

A Figura 7 apresenta as séries de SPEI e SSI para o período de acumulação de 6 meses para todas as bacias hidrográficas analisadas. Os resultados para as escalas de tempo de 3 e 12 meses são mostrados nas Figuras A1 e A2. Como esperado, os resultados mostram que há mais eventos de secas meteorológicas do que secas hidrológicas. Isso se deve ao fato de que nem sempre um evento de seca meteorológica ocasiona uma seca hidrológica. Secas fracas e curtas tendem a não evoluir para secas hidrológicas. Os eventos de secas meteorológicas são mais curtos que os eventos de secas hidrológicas. Os resultados também mostram que para algumas regiões os eventos de secas aumentaram e ficaram mais severos com o passar do tempo. De 2012 em diante, fica evidente nas séries de SSI os eventos de secas extremas que afetaram o nordeste e o sudeste do país (e.g. Gutiérrez et al., 2014; Melo et al., 2016; Marengo et al., 2017; de Brito et al., 2021). A mediana das séries de SPEI e SSI para o Brasil e as demais regiões, bem como o intervalo interquartil são apresentadas na Figura 9 para a escala de tempo de 6 meses, as escalas de 3 e 12 meses são apresentadas nas Figuras A3 e A4.

Os eventos de seca estão aumentando e ficando mais severos em quase todas as regiões do Brasil. Os resultados são sustentados pela análise de tendências nas séries de SPEI e SSI (Figura 8). Os testes de tendência indicaram que a tendência na magnitude dos índices de secas aumenta conforme a escala de tempo aumenta. As séries de SSI apresentaram tendência maiores comparado as séries de SPEI, e ambos os índices apresentam um padrão espacial semelhante, com tendências positivas no norte da Amazônia e no Sul do Brasil. Já o resto do país apresentou tendências negativas, especialmente na região do São Francisco. Ainda, a maioria das bacias apresentaram tendência significativas para os três períodos de acumulação mostrados na Figura 8. Para o SPEI, 64%, 72% e 75% das bacias possuem tendências significativas para as escalas de 3, 6 e 12 meses, respectivamente. Para o SSI, esses valores foram de 73%, 76% e 82%. Os resultados são similares com o que Brasil Neto et al. (2021) encontraram para o SPI no estado da Paraíba. Os resultados mostraram que conforme os períodos de acumulação aumentam, maior é a declividade de Sen e mais significativa é a tendência. O mais relevante é que as tendências para as secas hidrológicas são maiores que as das secas meteorológicas, o que sugere que outros fatores (i.e., evaporação e o uso da água) influenciam a propagação das secas meteorológicas para hidrológicas.

Figura 7 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 6 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias.

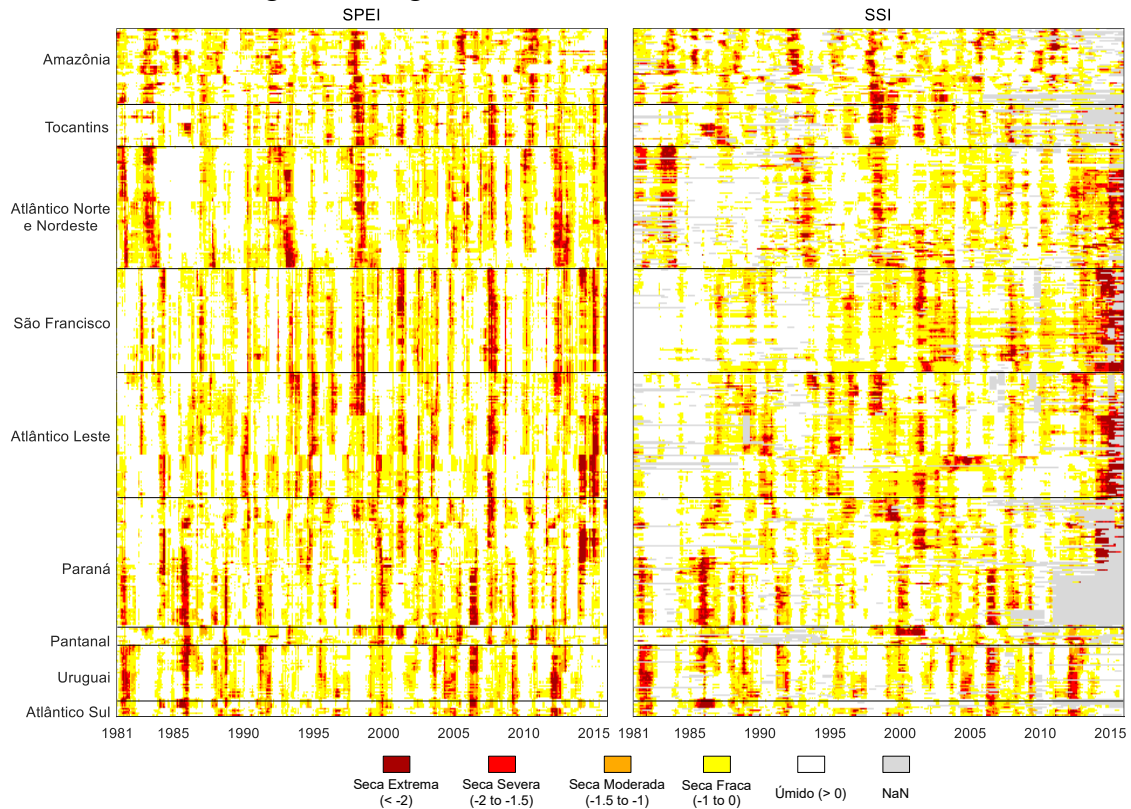


Figura 8 - Tendência nas séries de SPEI e SSI para as escalas de tempo de 3, 6 e 12 meses para as 457 bacias analisadas. Os marcadores com borda grossa apresentaram tendências significativas para o teste de Mann-Kendall. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias hidrográficas.

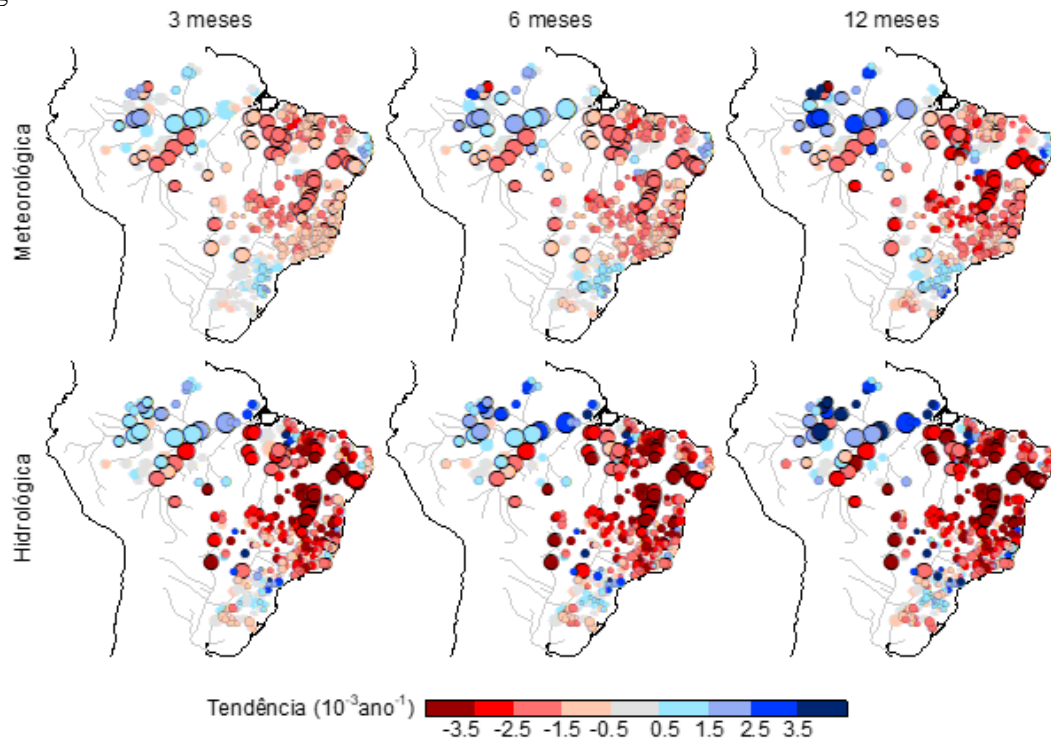
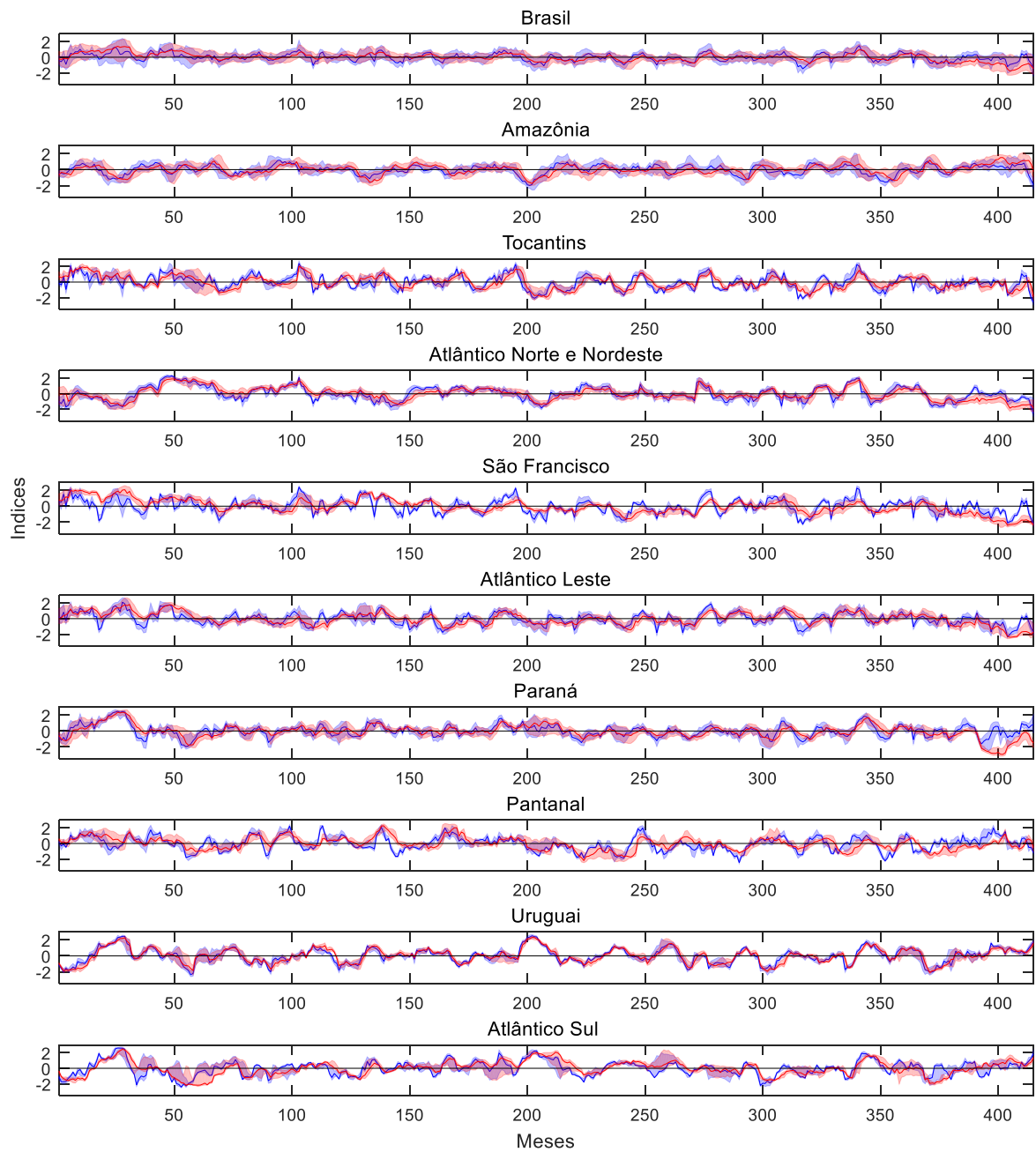


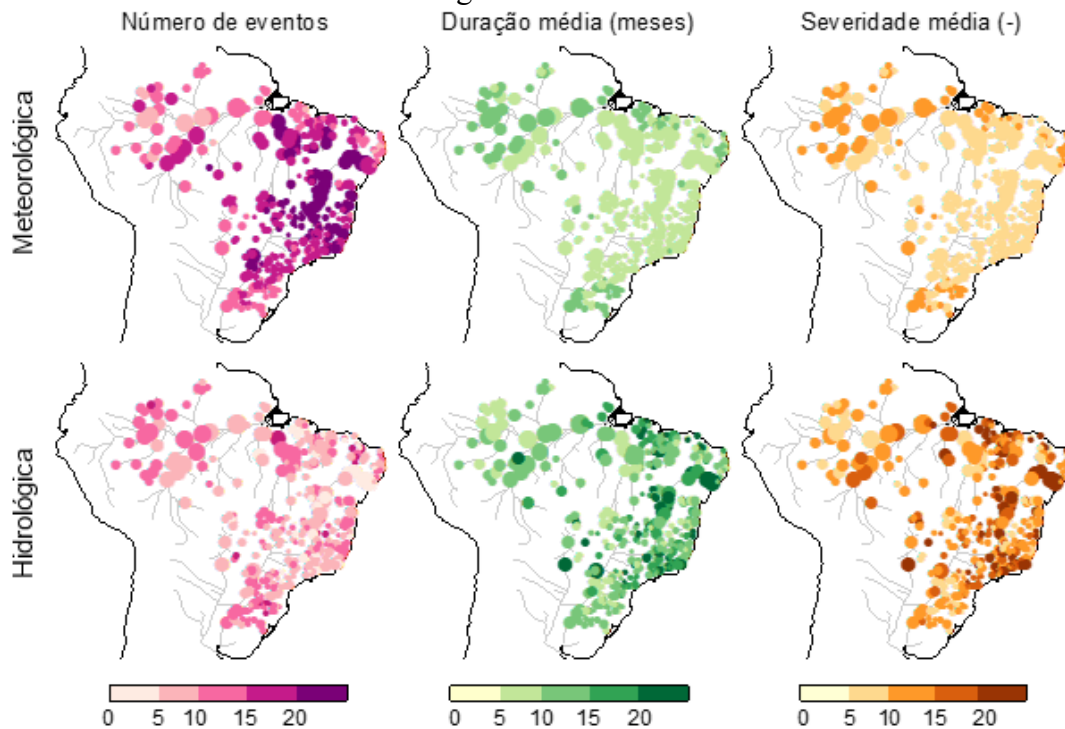
Figura 9 - Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil erro (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 6 meses.



4.2. CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECAS

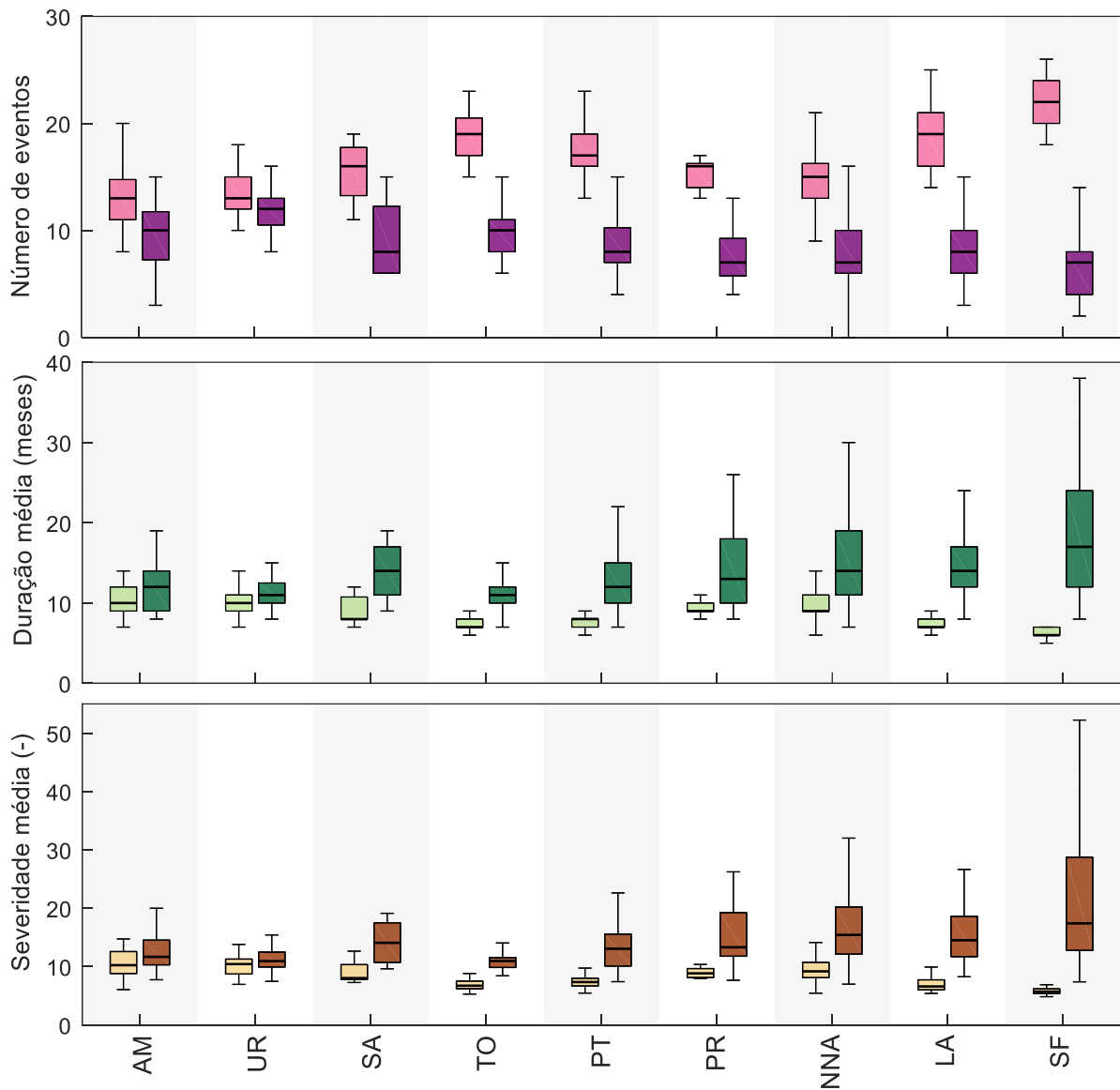
As Figuras 10 e 11 mostram o número de eventos, a duração e severidade das secas meteorológicas e hidrológicas para o período de acumulação de 6 meses. Conforme o período de acumulação aumenta, a duração e a severidade também aumentam enquanto o número de eventos diminui (Figuras B1 e B2). As secas meteorológicas foram mais frequentes nas regiões nordestes, com uma média de 22 eventos nos últimos 35 anos na região do São Francisco. Os eventos de secas meteorológicas foram menos frequentes na região da Amazonia e do Rio Uruguai, com uma média de 13 eventos cada região. Diferente do que se esperava, as regiões mais úmidas do país (Amazônia e o Sul) apresentaram os eventos de secas mais severos e mais duradouros. Já as secas hidrológicas apresentaram características diferentes, as secas mais severas e duradouras ocorreram nas regiões Nordeste e Sudeste do país. Em especial, na região do São Francisco um evento de seca dura em torno de 17 meses, enquanto na Amazônia um evento dura em torno de 10 meses. Como já esperado, as secas hidrológicas apresentaram menos eventos e esses eventos foram mais duradouros e mais severos em comparação ao das secas meteorológicas. Isto é, os eventos de secas hidrológicas foram 2 vezes menos frequentes, 1,7 vezes mais longos e 2 vezes mais severos que os de secas meteorológicas.

Figura 10 - Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 6 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas.



Analisando as regiões individualmente (Figura 11), temos que para o número de eventos, duração e severidade média, a região do Rio São Francisco apresentou a maior variação entre as secas meteorológicas e hidrológicas. Já a região do Rio Uruguai apresentou as menores variações entre as características dos eventos de seca. Esses resultados podem indicar um grau de vulnerabilidade ou resiliência das bacias. Além disso, de acordo com a Figura 11, percebe-se que as características dos eventos variam significativamente pelo país.

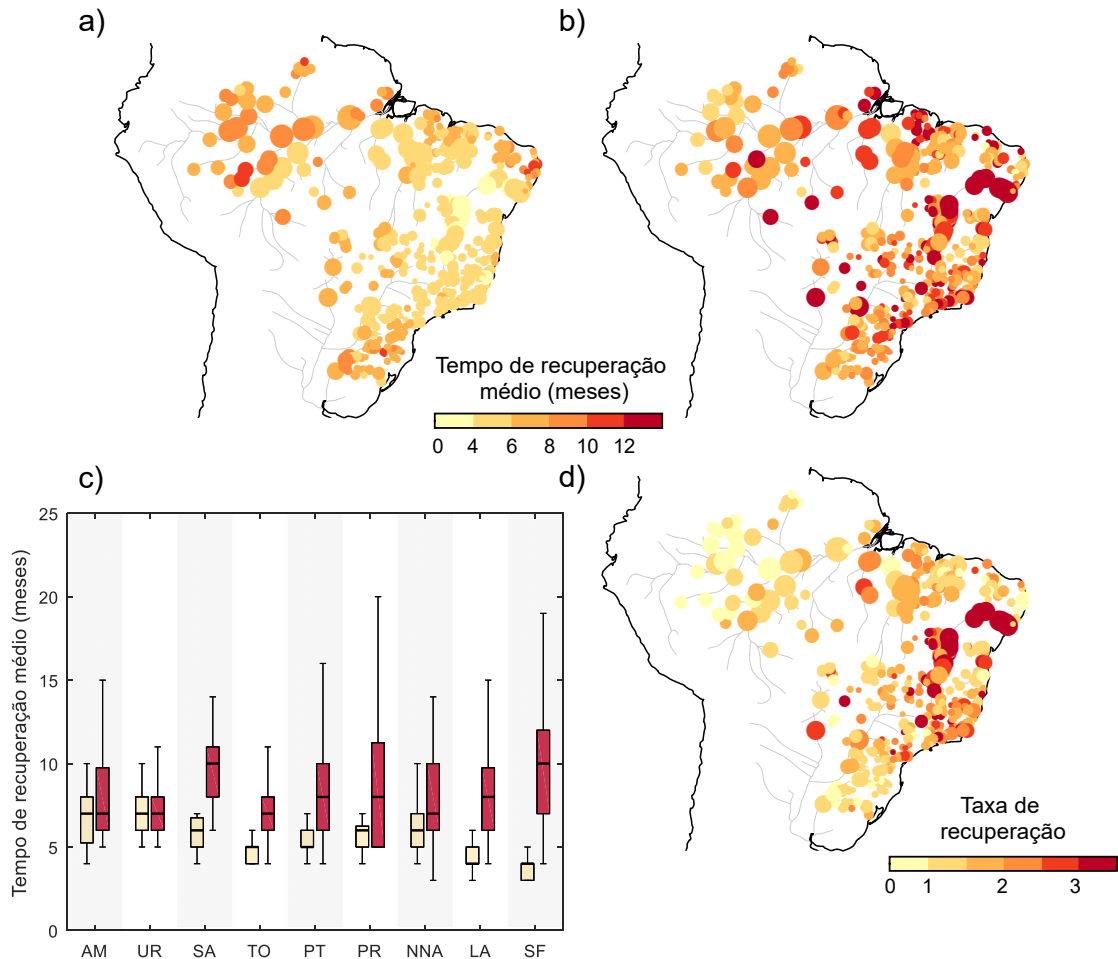
Figura 11 – Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 6 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A barra intermediária dos *boxplots* indicam a mediana, as caixas indicam os percentis 25 e 75, e os bigodes têm extensão máxima de 1.5 vezes o intervalo entre quartis. Para melhor visualização, outliers não foram inclusos nos *boxplots*.



4.3. TEMPO DE RECUPERAÇÃO

O tempo de recuperação médio dos eventos de secas meteorológicas e hidrológicas para a escala de tempo de 6 meses é apresentado nas Figuras 12 (a) e (b). Como esperado, para a maioria das bacias (77%), os eventos de seca hidrológicas levaram mais tempo para se recuperar do que os eventos de secas meteorológicas. No entanto, 23% das bacias tiveram um tempo de recuperação maior para os eventos de secas meteorológicas, a maioria dessas bacias estão localizadas na Amazônia.

Figura 12 - (a) $\bar{r}_{time,SPEI}$ e (b) $\bar{r}_{time,SSI}$ para a escala de tempo de 6 meses. (c) *Boxplot* do $\bar{r}_{time,SPEI}$ (cores claras) e $\bar{r}_{time,SSI}$ (cores escuras). (d) tx_r para 6 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do *boxplot* é a mesma da Figura 11.



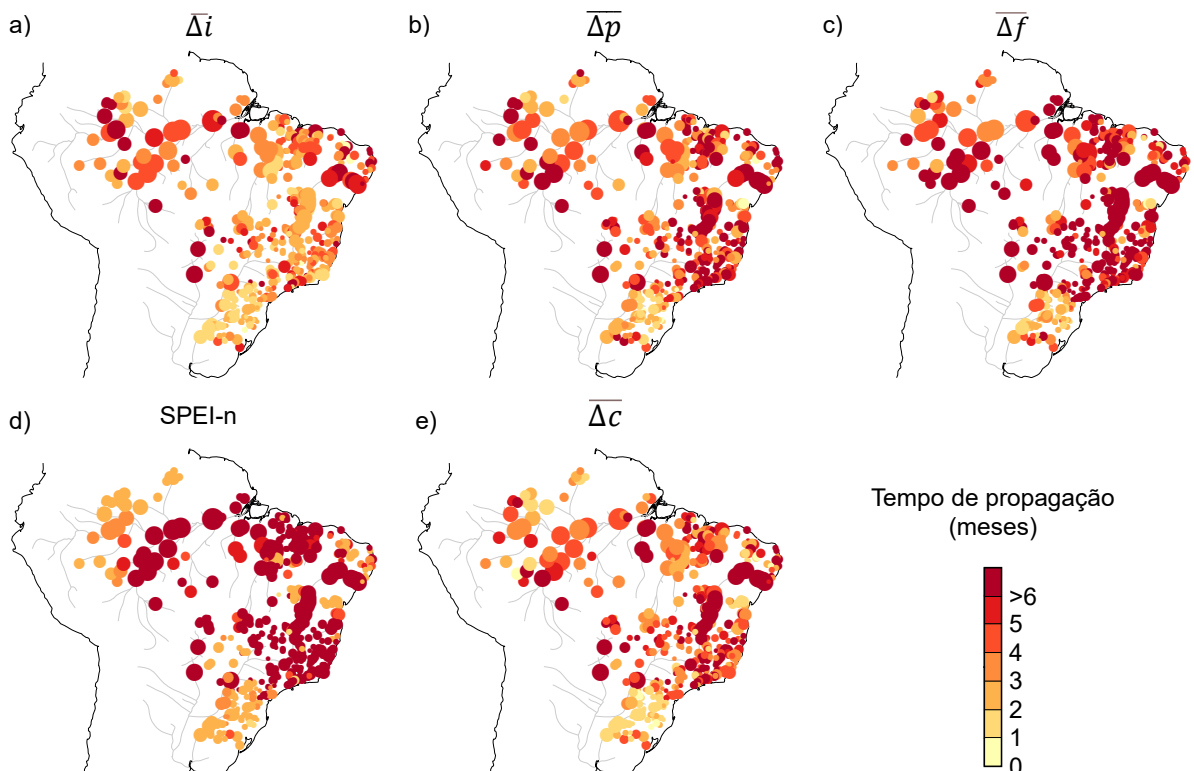
A Figura 12 (c) apresenta o *boxplot* do tempo de recuperação médio dos eventos de SPEI (cores claras) e SSI (cores escuras). Percebe-se que mais uma vez a região do rio São Francisco apresentou a maior variação entre o tempo de recuperação do SPEI e SSI, enquanto a região do Uruguai teve a menor variação. O que pode indicar que regiões com maiores variações entre o tempo de recuperação do SPEI e SSI provavelmente são mais vulneráveis aos eventos de secas do que as regiões com menores variações. A Figura 12 (d) mostra a taxa de

recuperação, que é a relação entre o tempo de recuperação médio do SSI e SPEI. Os resultados mostram que 47% das bacias possuem uma taxa de recuperação entre 1 e 2, enquanto 29% das bacias tiveram uma taxa de recuperação maior que 2. Esses resultados indicam em média quanto tempo mais leva para uma seca hidrológica recuperar em comparação as secas meteorológicas. Na região do São Francisco, para algumas bacias, as secas hidrológicas podem levar até mais de 4 vezes para recuperar do que as secas meteorológicas.

4.4. TEMPO DE PROPAGAÇÃO

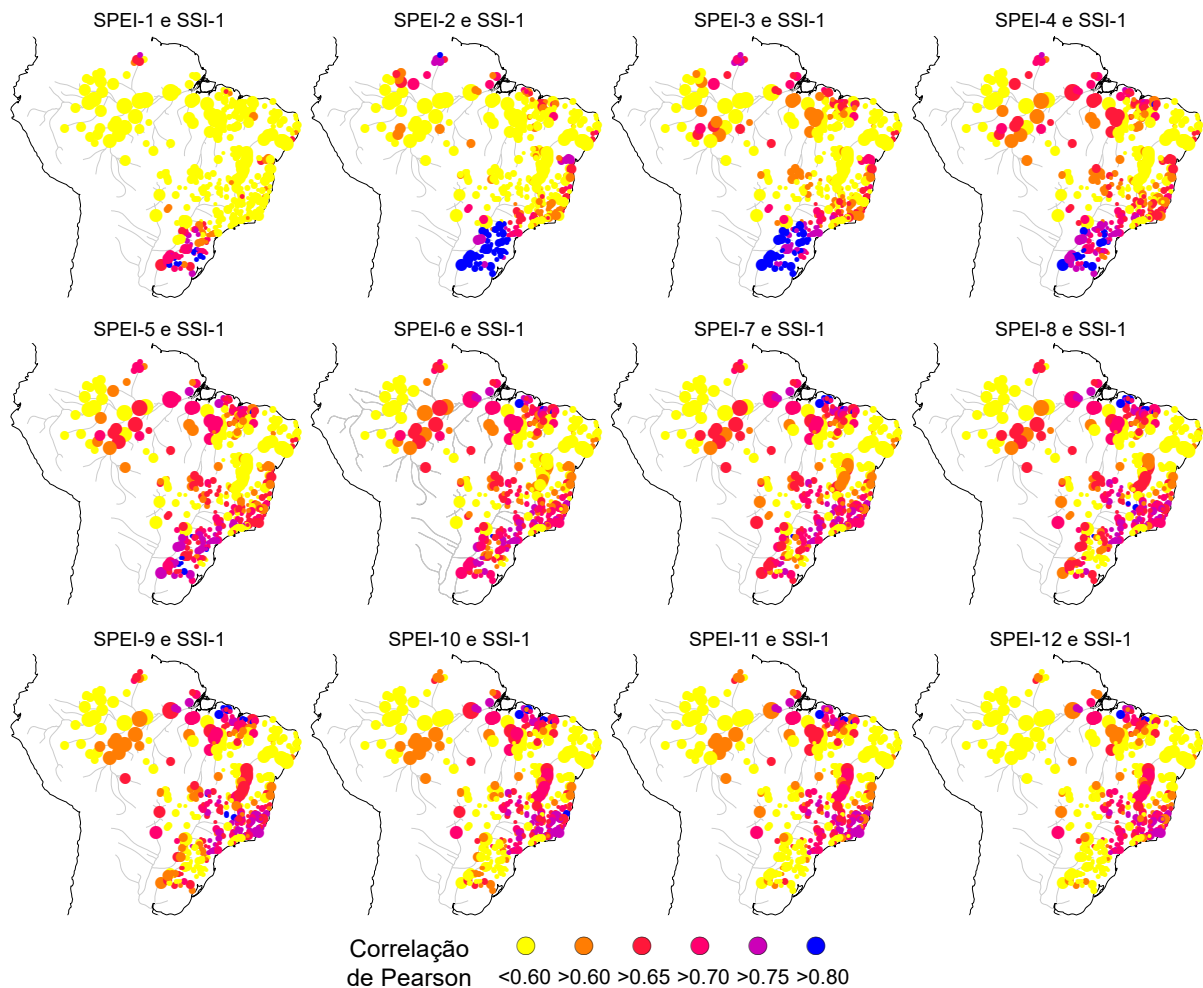
O tempo de propagação obtido através da correlação de Pearson é apresentado na Figura 13 (d). Os resultados para o SPEI-n mostram que para a maioria das bacias hidrográficas, o tempo de propagação foi de 2 e 8 meses para 119 e 67 bacias hidrográficas respectivamente. No entanto, para 59% das bacias hidrográficas o tempo de propagação variou entre 6 e 12 meses, indicando que para a maioria das bacias hidrográficas no país a propagação entre secas é lenta. Os resultados encontrados são diferentes do que Barker et al. (2016) e ZENG et al. (2015) encontraram para as bacias no Reino Unido e na China, onde o tempo de propagação foi predominantemente de 1 mês.

Figura 13 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 6 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.



O SPEI-n variou entre 6 e 12 meses para 57% das bacias hidrográficas na região do rio Paraná, para o restante das bacias (43%) o tempo de propagação variou entre 1 e 4 meses. O que sugere que nessa região, há áreas em que a propagação é mais lenta (e.g. Norte da região do Rio Paraná) e mais rápidas (e.g. Sul da Região do Rio Paraná). Resultados similares foram encontrados para as regiões do Tocantins e do Atlântico Norte e Nordeste. Para a região do Atlântico Leste e do São Francisco, o tempo de propagação variou entre 6 e 12 meses para 80% das bacias hidrográficas. Indicando, que nessa parte do país a propagação é lenta. Já para as regiões do Atlântico Sul e Uruguai, o SPEI-n foi de 2 meses para a maioria das bacias, o que indica que nessa região a propagação é rápida.

Figura 14 - Correlação de Pearson entre todos as escalas de tempo do SPEI com as séries de SSI-1. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.



A Figura 14 apresenta os resultados obtidos para a correlação de Pearson para os períodos de acumulação do SPEI de 1 a 12 com as séries de SSI-1. Embora as regiões do Atlântico Leste e do São Francisco tenham apresentado tempo de propagação predominantemente alto (6-12 meses), altas correlações já são observadas a partir do 3 mês. O que indica que os efeitos

de uma seca meteorológica já são sentidos na vazão a partir do 3 mês, e os mesmos são persistentes até o 12 mês. Portanto, o tempo de propagação nessas regiões pode ser muito mais rápido do que indicado pelo SPEI-n. Isso sugere, que considerar somente a maior correlação (SPEI-n) na análise do tempo de propagação pode superestimar o tempo de propagação para algumas bacias hidrográficas. Para as bacias nas regiões do Atlântico Leste e Uruguai apresentaram altas correlações para os períodos de 1 a 6 meses de acumulação. Os efeitos das secas meteorológicas podem ser sentidos nas vazões a partir do 1 mês e são persistentes até o 6 mês. Além disso, as bacias localizadas na Amazônia tiveram baixas correlações para todos os períodos de acumulação.

Os resultados mostram que bacias com áreas similares tiveram diferentes tempos de propagação, e bacias com diferentes áreas tiveram o mesmo tempo de propagação. As regiões do Atlântico Leste e do Rio São Francisco são as regiões mais secas do país, mas ainda sim foram as regiões que tiveram a maior propagação para a maioria das bacias hidrográficas (80%). Enquanto as regiões do Atlântico Sul, Uruguai e Tocantins e o Norte da Amazônia, regiões que possuem uma alta precipitação média anual, tiveram propagações rápidas. Foi investigado a relação entre o tempo de propagação, área da bacia e a precipitação média anual das bacias (seção 4.5). Os resultados indicam que não há relação entre a propagação e a área das bacias hidrográficas, similar ao que Barker et al. (2016) encontrou para as bacias do Reino Unido. Além disso, nenhuma relação foi encontrada entre o tempo de propagação e precipitação média anual, diferente do que Barker et al. (2016) encontrou, onde existe uma correlação negativa entre a precipitação média anual e o SPEI-n.

As Figura 13 (a)-(c) apresentam o tempo de propagação médio entre os inícios, picos e finais dos eventos de secas para escala de tempo de 6 meses. Percebe-se que para algumas bacias, o tempo de propagação aumenta do início para o pico e do pico para o final do evento. Indicando que secas hidrológicas levam mais tempo para atingir seu pico e seu final do que para começar o evento. Resultados similares foram encontrados para outros períodos de acumulação (3 e 12 meses, Figuras D1 e D2). Conforme a escala de tempo aumenta, o tempo médio de propagação também aumenta, para os três indicadores analisados. Os resultados obtidos, são diferentes dos encontrados para a correlação de Pearson. Para a maioria das bacias hidrográficas (79%), o tempo de propagação médio dos inícios (Figura 13 (a)) foi inferior ao encontrado para o SPEI-n. Além disso, 91% das bacias apresentaram um tempo de propagação inferior a 6 meses, indicando que a propagação entre os inícios dos eventos de seca é relativamente rápida. A propagação entre os picos apresentou valores inferiores a 6 meses para 65% das bacias, o que

também indica que a propagação entre os picos pode ser rápida. Já para a propagação entre o final dos eventos de secas, 52 % das bacias tiveram um tempo variando entre 6 e 12 meses. Os outros 48% apresentaram uma propagação mais rápida, variando de 1 a 5 meses.

O tempo de propagação obtido pela diferença entre os centros de massa para a escala de tempo de 6 meses é apresentado na Figura 13 (e). Para 68% das bacias hidrográficas o tempo de propagação foi menor que 6 meses. O resultado é similar ao tempo da propagação dos picos. Apesar de ter sido calculado o tempo de propagação utilizando diferentes métodos, para as regiões do Atlântico sul, Uruguai e o Sul da região do Rio Paraná, todos os métodos indicaram uma propagação rápida. As diferenças encontradas entre os resultados dos indicadores do tempo de propagação sugerem que a análise do tempo de propagação pode depender completamente do método que está sendo utilizado.

De todos os eventos selecionados para a análise do tempo de propagação pelo método 2 e 3, a maioria (81%) dos eventos de secas hidrológicas foram causados por um único evento de seca meteorológica, enquanto 19% dos eventos foram causados por múltiplos eventos de secas meteorológicas. A região do São Francisco foi a região com maior número (41%) de eventos de secas hidrológicas causados por múltiplos eventos de secas meteorológicas. Já na região do Uruguai esse número foi de apenas 4%. Além disso, foram analisados 65% de todos os eventos de secas meteorológicas que se propagaram para uma seca hidrológica. Já para as secas hidrológicas foram analisados 84% dos eventos que ocorreram devido a uma seca meteorológica. Ainda, considerando todos os eventos de secas meteorológicas, somente 53% deram origem a uma seca hidrológica. Já para todos os eventos de secas hidrológicas, 78% originaram-se de uma seca meteorológica. Ou seja, 22% dos eventos de seca hidrológica ocorreram sozinhos.

4.5. PRINCIPAIS CONTROLES NOS EVENTOS DE SECAS

A Figura 15 apresenta a relação das características dos eventos de seca, do tempo de recuperação dos eventos de secas pela precipitação média anual, pelo índice de escoamento de base, pelo índice de aridez e pela área da bacia para a escala de tempo de 6 meses. Visualmente, a relação entre essas variáveis parece ser fraca, exceto para o índice de escoamento de base e as características do SSI. Analisando a Figura 21, que apresenta a correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias, os resultados indicam que as características das secas meteorológica apresentaram uma correlação moderada e significativa com a precipitação média anual e o índice de aridez. Já as características das secas hidrológicas apresentaram correlações moderadas e significativas com o índice de escoamento de base. Quanto maior o

índice de escoamento de base menor a quantidade de eventos de secas hidrológica, e as bacias hidrográficas com alto índice de escoamento de base podem ser mais resilientes a períodos secos (Fan, 2015). Os resultados ainda mostram que embora o número de eventos seja menor, esses eventos tendem a ser mais duradouros, severos e tendem a possuir tempo de recuperação maior, conseqüentemente uma taxa de recuperação maior. Para a área da bacia e o grau de regularização, as correlações de Spearman foram próximas de zero o que indica que não relação com essas variáveis. Resultados similares foram obtidos para as escalas de tempo de 3 e 12 meses que se encontram no Anexo F (Figuras F1-F2 e F13-F14).

A relação dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual, pelo índice de escoamento de base, pelo índice de aridez, pela área da bacia e pelo grau de regularização são apresentados nas Figuras 16 a 20. Os resultados mostram que visualmente não há uma relação clara entre os indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez e pela área da bacia (Figura 16, 18 e 19). A Figura 22 apresenta a correlação de Spearman entre os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Os resultados indicam que houve uma correlação fraca e significativa entre os indicadores do tempo de propagação e a precipitação média anual e o índice de aridez. Para o índice de escoamento de base, as correlações foram moderadas e significativas, principalmente para o Δp , Δf , e Δc . Ou seja, conforme aumenta o índice de escoamento de base maior será o tempo de propagação, conseqüentemente mais lenta será a propagação entre as secas. Além disso, para a área da bacia e o grau regularização das bacias, a correlação foi fraca indicando que a presença de reservatórios e o tamanho da bacia aparentemente não são os principais controles na propagação das secas. Resultados similares foram obtidos para as escalas de tempo de 3 e 12 meses que se encontram no Anexo F (Figuras F3 - F12 e F15- F16).

Figura 15 - *Scatterplot* das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

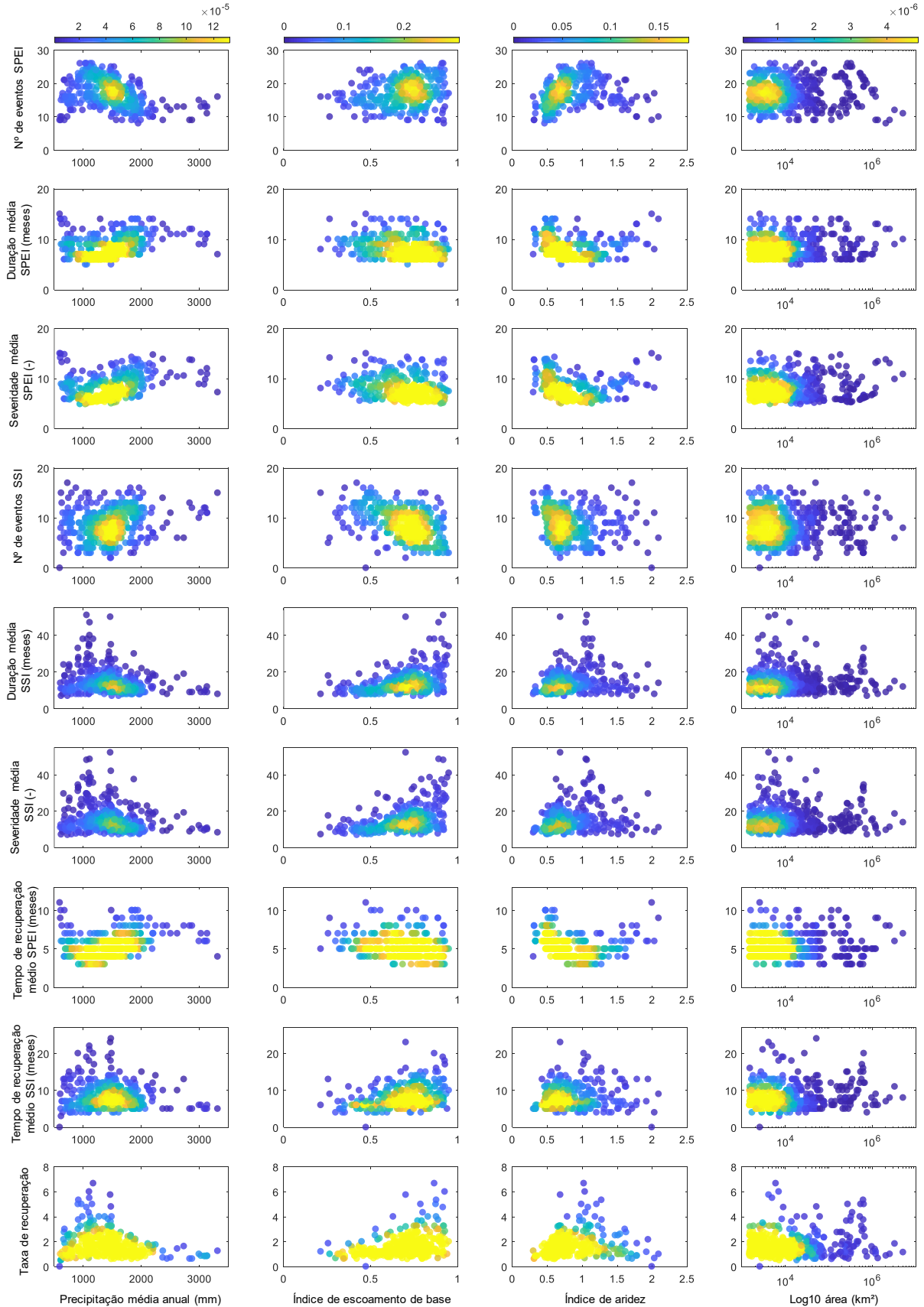


Figura 16 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

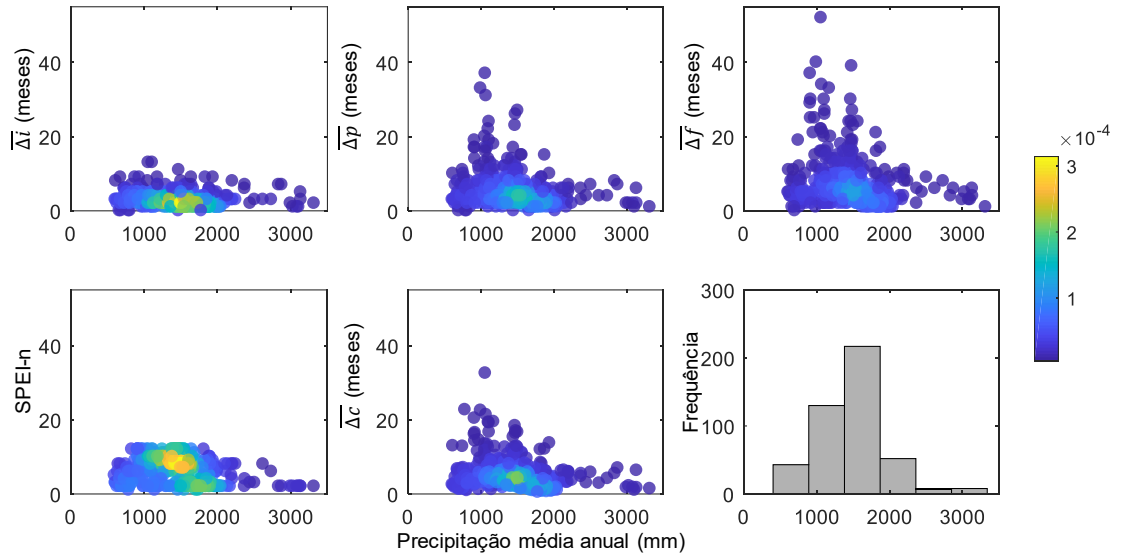


Figura 17 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

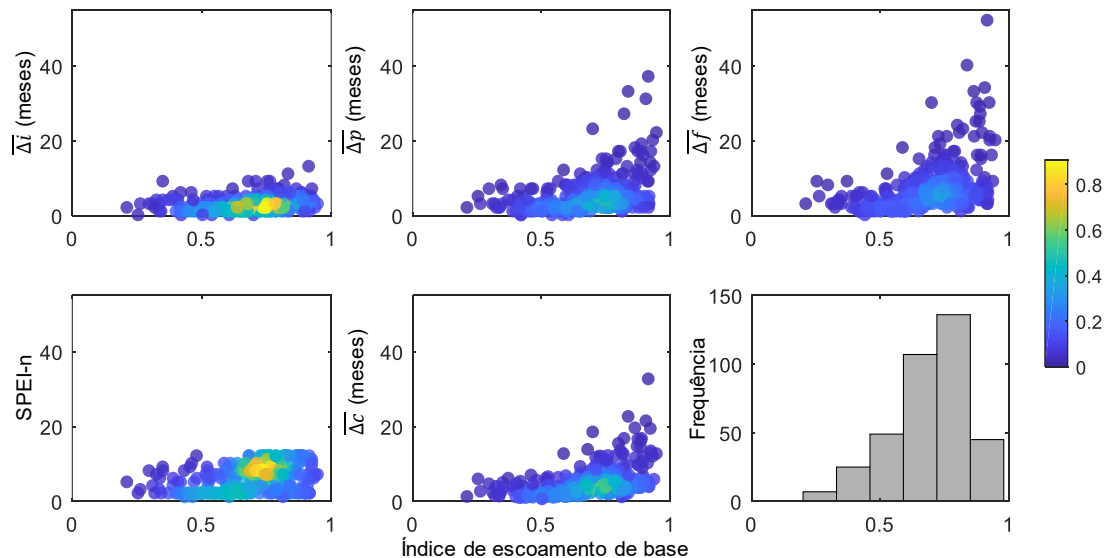


Figura 18 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

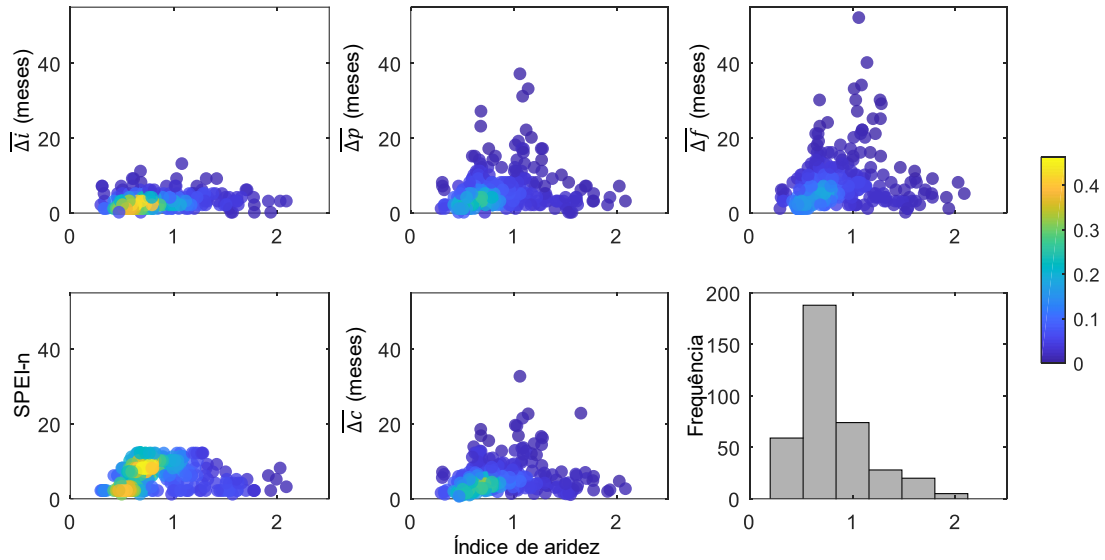


Figura 19 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma da área da bacia. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

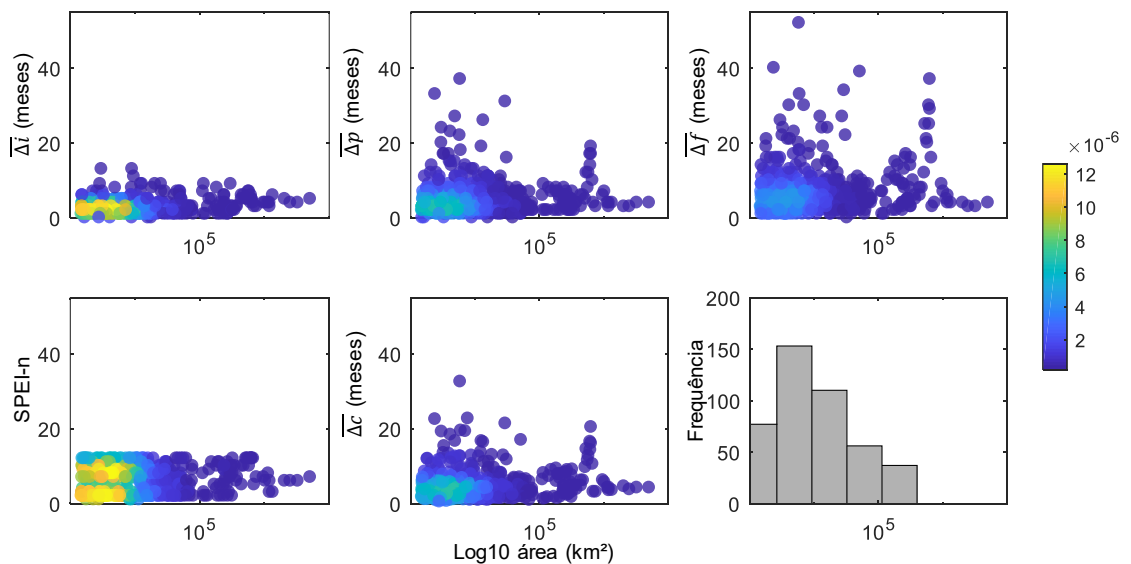


Figura 20 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização da bacia e o histograma do grau de regularização da bacia. A escala de tempo do $\overline{\Delta l}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 6 meses. As cores representam a densidade de Kernel estimada.

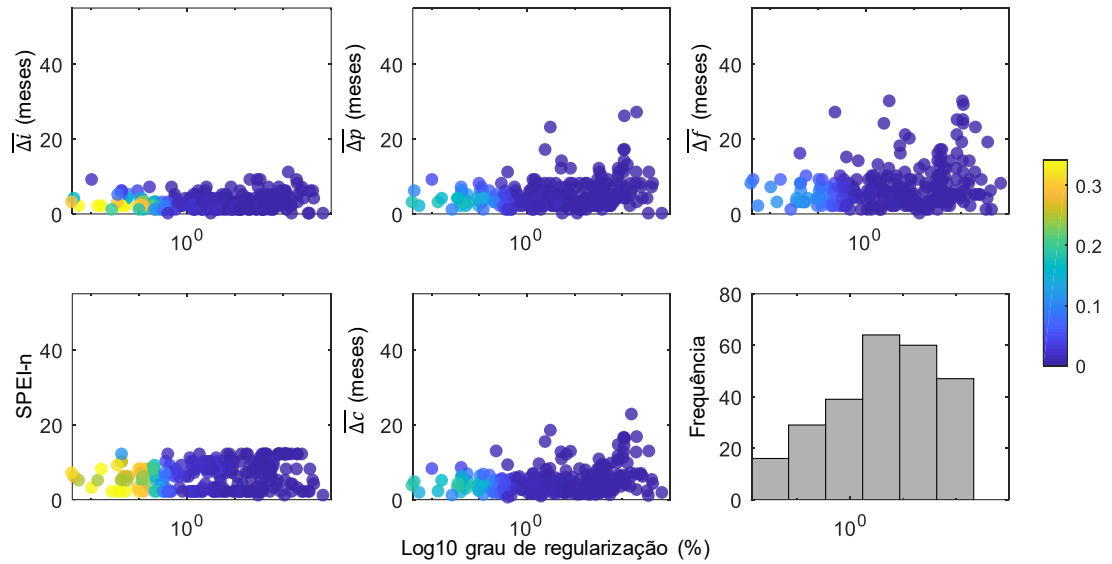


Figura 21 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 6 meses. Número de eventos, duração média, severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG)

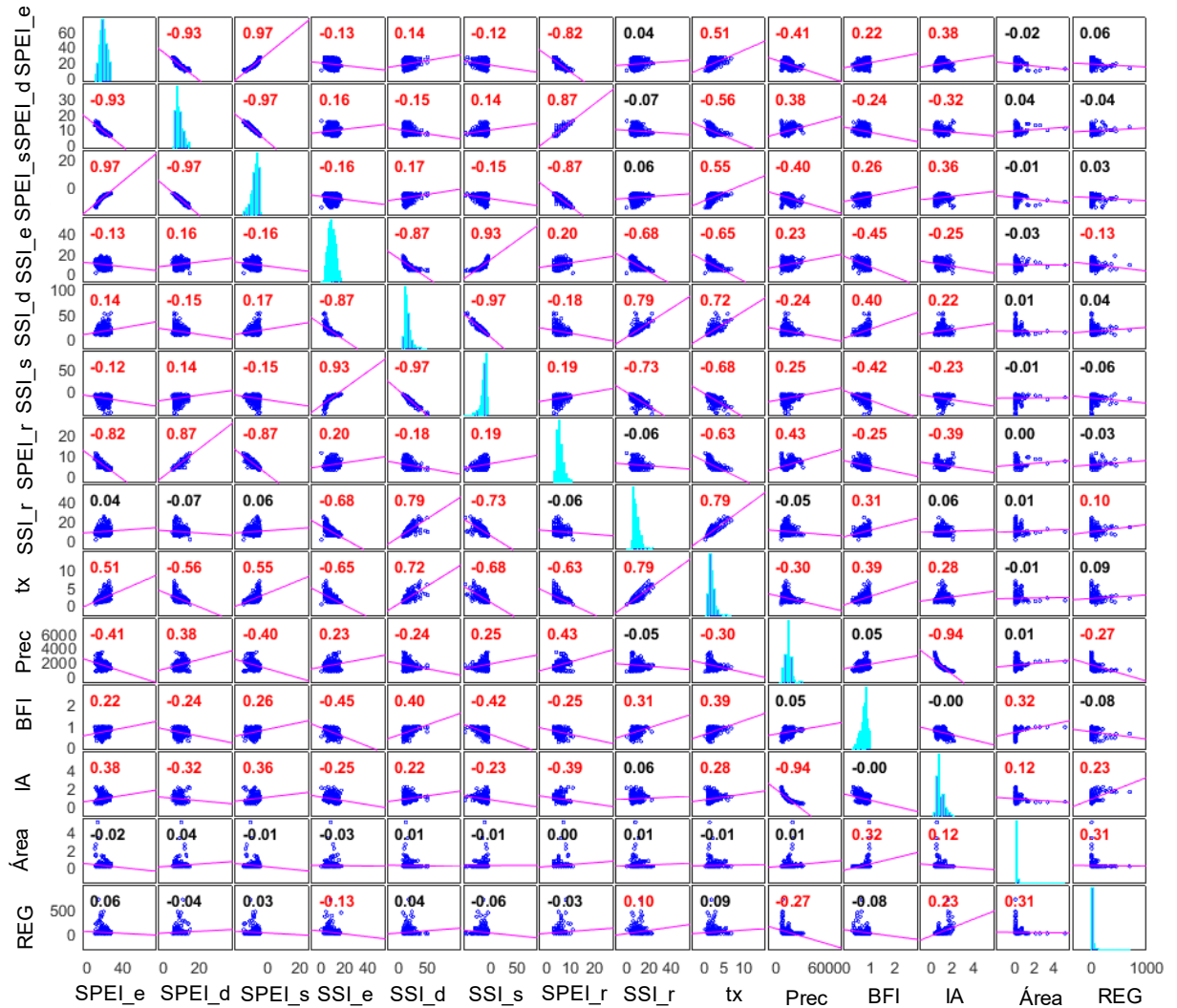
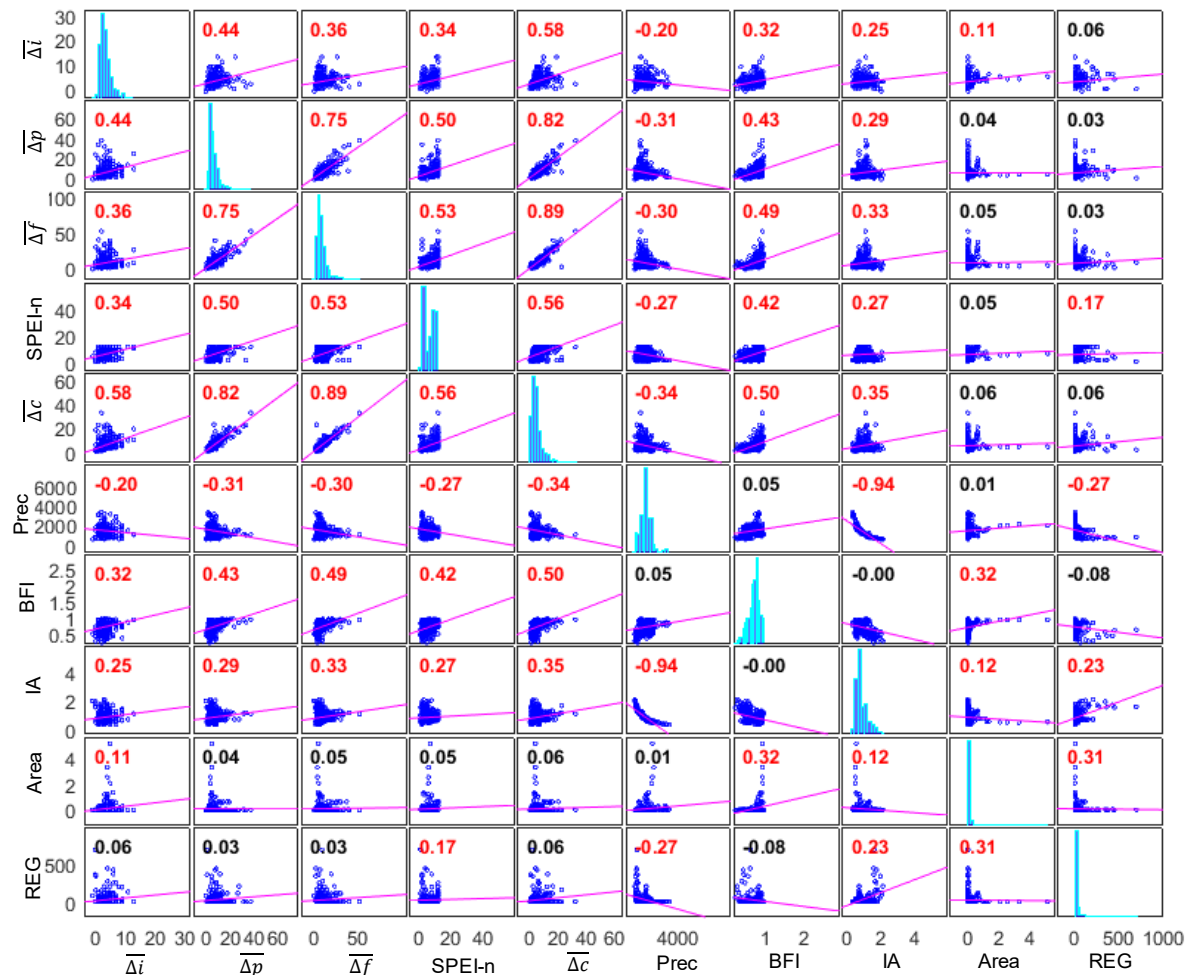


Figura 22 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 6 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG)



5. CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se diferentes indicadores para identificar e analisar os eventos de secas meteorológicas e hidrológicas em 457 bacias hidrográficas no Brasil. Foram calculadas as características desses eventos e estimados os tempos de propagação de uma seca meteorológica para hidrológica através da comparação entre diferentes metodologias.

Os resultados mostram que as secas meteorológicas são mais frequentes e menos severas que as secas hidrológicas para a maior parte do país. Não houve uma coerência espacial clara entre as características das secas meteorológicas com secas hidrológicas. Eventos de secas meteorológicas em pequena escala podem ser atenuados pelas bacias hidrográficas e podem, portanto, não se propagar para uma seca hidrológica. No entanto, uma sequência desses eventos pode levar a eventos de secas hidrológicas mais longas e severas. As tendências nas secas hidrológicas são mais pronunciadas do que o esperado apenas pelas tendências nas secas meteorológicas, destacando a importância de se considerar outras causas das secas hidrológicas tais como mudanças no uso da terra e uso da água.

O tempo de recuperação e a taxa de recuperação variam de acordo com a região e severidade dos eventos de secas. O tempo de recuperação dos eventos de seca hidrológica é em média duas vezes maior que dos eventos de seca meteorológicas. A região do São Francisco (uma das regiões mais secas no Brasil) e a região do Rio Paraná (região altamente impactada por atividades antrópicas) destacam-se pela variabilidade e altos valores para a taxa de recuperação.

Na análise dos principais controles dos eventos de secas, o índice de escoamento de base apresentou a maior relação com as características dos eventos de secas, com o tempo de recuperação e com o tempo de propagação. Quanto maior o índice de escoamento de base menor o número de eventos de secas hidrológicas e mais lenta é a propagação entre os eventos de secas, porém os eventos são mais duradouros e mais severos. A relação entre o tempo de propagação e os indicadores climáticos (índice de aridez e precipitação média anual), fisiográficos (área da bacia) e de influência antrópica (reservatórios) foi menos clara.

Com relação ao tempo de propagação, muitas bacias apresentaram uma propagação maior que quatro meses, o que é consideravelmente maior do que o estimado anteriormente na literatura. Fica claro que o tempo de propagação entre secas meteorológicas para hidrológicas pode variar consideravelmente dependendo do índice utilizado. Por exemplo, a diferença entre o tempo de início de uma seca meteorológica para uma seca hidrológica é menor do que o tempo

entre os picos e os finais dos eventos de secas. Enquanto é possível estimar os inícios de uma seca hidrológica, é muito mais difícil de prever quanto uma seca hidrológica vai durar em comparação a uma seca meteorológica. Esses resultados sugerem que caracterizar as secas meteorológicas não é o suficiente para caracterizar completamente as secas. A utilização de múltiplos indicadores, como os indicadores do tempo de recuperação e os indicadores do tempo de propagação, são necessários para que se possa determinar os mecanismos do desenvolvimento dos eventos de secas e da propagação através do ciclo hidrológico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAKOUCHAK, A.; MIRCHI, A.; MADANI, K.; DI BALDASSARRE, G.; NAZEMI, A.; ALBORZI, A.; ANJILELI, H.; AZARDEKAKHSH, M.; CHIANG, F.; HASSANZADEH, E.; HUNING, L. S.; MALLAKPOUR, I.; MARTINEZ, A.; MAZDIYASNI, O.; MOFTAKHARI, H.; NOROUZI, H.; SADEGH, M.; SADEQI, D.; VAN LOON, A. F.; WANDERS, N. Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. *Reviews of Geophysics*, v. 59, n. 2, 20 jun. 2021.

APURV, T.; CAI, X. Drought Propagation in Contiguous U.S. Watersheds: A Process-Based Understanding of the Role of Climate and Watershed Properties. *Water Resources Research*, v. 56, n. 9, p. 0–3, 20 set. 2020.

APURV, T.; SIVAPALAN, M.; CAI, X. Understanding the Role of Climate Characteristics in Drought Propagation. *Water Resources Research*, v. 53, n. 11, p. 9304–9329, nov. 2017.

AWANGE, J. L.; MPELASOKA, F.; GONCALVES, R. M. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. *Science of The Total Environment*, v. 566–567, p. 1472–1488, out. 2016.

BAE, H.; JI, H.; JIN, Y.; YOUNG, L.; MOON, R.; KIM, H. Characteristics of drought propagation in South Korea: relationship between meteorological, agricultural, and hydrological. *Natural Hazards*, v. 99, n. 1, p. 1–16, 2019.

BAGLEY, J. E.; DESAI, A. R.; HARDING, K. J.; SNYDER, P. K.; FOLEY, J. A. Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *Journal of Climate*, v. 27, n. 1, p. 345–361, 2014.

BARKER, L. J.; HANNAFORD, J.; CHIVERTON, A.; SVENSSON, C. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 6, p. 2483–2505, 24 jun. 2016.

BEST, J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*, v. 12, n. 1, p. 7–21, 2019.

BRÁS, T. A.; JÄGERMEYR, J.; SEIXAS, J. Exposure of the EU-28 food imports to extreme weather disasters in exporting countries. *Food Security*, v. 11, n. 6, p. 1373–1393, 17 dez. 2019.

BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. DA C.; DA SILVA, R. M.; DOS SANTOS, C. A. C.; MISHRA, M. Evaluation of the TRMM product for monitoring drought over Paraíba State, northeastern Brazil: a trend analysis. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 1097, 13 dez. 2021.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 517–529, fev. 2018.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; ADDOR, N.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A. CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. *Earth System Science Data*, v. 12, n. 3, p. 2075–2096, 8 set. 2020.

CHATFIELD, C. *The Analysis of Time Series*. [s.l.] Chapman and Hall/CRC, 2016.

CHEN, N.; LI, R.; ZHANG, X.; YANG, C.; WANG, X.; ZENG, L.; TANG, S.; WANG, W.; LI, D.; NIYOGI, D. Drought propagation in Northern China Plain: A comparative analysis of GLDAS and MERRA-2 datasets. *Journal of Hydrology*, v. 588, n. February, p. 125026, set. 2020.

CPC- CLIMATE PREDICTION CENTER. CPC US Unified Precipitation Data. Colorado, USA, Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/> . Acesso em outubro 2018.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, v. 10, n. 11, p. 642, 24 out. 2019.

DE BRITO, Y. M. A.; RUFINO, I. A. A.; BRAGA, C. F. C.; MULLIGAN, K. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, n. 1, p. 31, 5 jan. 2021.

DOUGHTY, C. E.; METCALFE, D. B.; GIRARDIN, C. A. J.; AMÉZQUITA, F. F.; CABRERA, D. G.; HUASCO, W. H.; SILVA-ESPEJO, J. E.; ARAUJO-MURAKAMI, A.; DA COSTA, M. C.; ROCHA, W.; FELDPAUSCH, T. R.; MENDOZA, A. L. M.; DA COSTA, A. C. L.; MEIR, P.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y. Drought impact on forest carbon dynamics and

fluxes in Amazonia. *Nature*, v. 519, n. 7541, p. 78–82, 2015.

ELKOLLALY, M.; KHADR, M.; ZEIDAN, B. Drought analysis in the Eastern Nile basin using the standardized precipitation index. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 31, p. 30772–30786, nov. 2018.

ELTAHIR, E. A. B.; YEH, P. J. F. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. *Water Resources Research*, v. 35, n. 4, p. 1199–1217, abr. 1999.

FAN, Y. Groundwater in the Earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes. *Water Resources Research*, v. 51, n. 5, p. 3052–3069, 2015.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, p. 1–21, 2015.

GETIRANA, A. Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. *Journal of Hydrometeorology*, v. 17, n. 2, p. 591–599, fev. 2016.

GEVAERT, A. I.; VELDKAMP, T. I. E.; WARD, P. J. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, n. 9, p. 4649–4665, 6 set. 2018.

GIBBONS, J. D.; CHAKRABORTI, S. *Nonparametric Statistical Inference (Statistics: A Series of Textbooks and Monographs)*. [s.l: s.n.].

GU, L.; CHEN, J.; YIN, J.; XU, C.-Y.; CHEN, H. Drought hazard transferability from meteorological to hydrological propagation. *Journal of Hydrology*, v. 585, n. February, p. 124761, jun. 2020.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes*, v. 3, p. 95–106, jun. 2014.

GUTTMAN, N. B. ACCEPTING THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX: A CALCULATION ALGORITHM 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 35, n. 2, p. 311–322, abr. 1999.

HAN, Z.; HUANG, S.; HUANG, Q.; LENG, G.; WANG, H.; BAI, Q.; ZHAO, J.; MA,

L.; WANG, L.; DU, M. Propagation dynamics from meteorological to groundwater drought and their possible influence factors. *Journal of Hydrology*, v. 578, n. June, p. 124102, nov. 2019.

HAO, Z.; AGHAKOUCHAK, A. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, v. 57, p. 12–18, 2013.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, v. 18, n. 1, p. 14–20, fev. 1982.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 92, n. 4, p. 485–488, 1 abr. 2011.

HEIM, R. R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 8, p. 1149–1165, ago. 2002.

HISDAL, H.; TALLAKSEN, L. M. *Technical Report No . 6 Drought Event Definition Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe*. [s.l: s.n.].

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R.; WOOD, E. F. Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. *Source: Technometrics*, v. 27, n. 3, p. 25, 1985.

HUANG, S.; LI, P.; HUANG, Q.; LENG, G.; HOU, B.; MA, L. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, v. 547, p. 1

IPCC (2013) Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds). *Cambridge University Press*, Cambridge, pp 1535 doi:10.1017/CBO9781107415324

IPCC (2014) Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach

KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds). *Cambridge University Press*, Cambridge, pp 113284–195, 2017.

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

LADSON, A. R.; BROWN, R.; NEAL, B.; NATHAN, R. A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australian Journal of Water Resources*, v. 17, n. 1, p. 25–34, 2013.

LI, Q.; HE, P.; HE, Y.; HAN, X.; ZENG, T.; LU, G.; WANG, H. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis. *Atmospheric Research*, v. 234, n. March 2019, p. 104743, abr. 2020.

LOPES, A. V.; CHIANG, J. C. H.; THOMPSON, S. A.; DRACUP, J. A. Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 7, p. 3307–3316, 16 abr. 2016.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 12, p. 1–5, 2011.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ LEAL, K. R.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; MICHELIN, C. M.; DE PRAGA BAIÃO, C. F.; CHUCHÓN ÂNGULO, E.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, n. February, 2021.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, mar. 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 9 ago. 2017.

MARTENS, B.; MIRALLES, D. G.; LIEVENS, H.; VAN DER SCHALIE, R.; DE JEU, R. A. M.; FERNÁNDEZ-PRIETO, D.; BECK, H. E.; DORIGO, W. A.; VERHOEST, N. E. C.

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

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

MCKEE, T. B.; NOLAN, J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc.*, n. January, p. 179–184, 1993.

MEHRAN, A.; MAZDIYASNI, O.; AGHAKOUCHAK, A. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*. p. 7520–7533, 2015.

MELO, D. DE C. D.; SCANLON, B. R.; ZHANG, Z.; WENDLAND, E.; YIN, L. Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 11, p. 4673–4688, 24 nov. 2016.

MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; GASH, J. H.; MEESTERS, A. G. C. A.; DOLMAN, A. J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 2, p. 453–469, 2011.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, set. 2010.

MORALES, M. S.; COOK, E. R.; BARICHIVICH, J.; CHRISTIE, D. A.; VILLALBA, R.; LEQUESNE, C.; SRUR, A. M.; FERRERO, M. E.; GONZÁLEZ-REYES, Á.; COUVREUX, F.; MATSKOVSKY, V.; ARAVENA, J. C.; LARA, A.; MUNDO, I. A.; ROJAS, F.; PRIETO, M. R.; SMERDON, J. E.; BIANCHI, L. O.; MASIOKAS, M. H.; URRUTIA-JALABERT, R.; RODRIGUEZ-CATÓN, M.; MUÑOZ, A. A.; ROJAS-BADILLA, M.; ALVAREZ, C.; LOPEZ, L.; LUCKMAN, B. H.; LISTER, D.; HARRIS, I.; JONES, P. D.; WILLIAMS, A. P.; VELAZQUEZ, G.; ALISTE, D.; AGUILERA-BETTI, I.; MARCOTTI, E.; FLORES, F.; MUÑOZ, T.; CUQ, E.; BONINSEGNA, J. A. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 29, p. 16816–16823, 21 jul. 2020.

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; THAKUR, M. K.; DE OLIVEIRA BURITI, C. Long-Term Spatiotemporal

Variation of Droughts in the Amazon River Basin. *Water*, v. 13, n. 3, p. 351, 30 jan. 2021.

PETERS, E.; TORFS, P. J. J. F.; VAN LANEN, H. A. J.; BIER, G. Propagation of drought through groundwater—a new approach using linear reservoir theory. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 15, p. 3023–3040, 30 out. 2003.

RODRIGUES, J. A. M.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A.; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. V. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. *International Journal of Climatology*, v. 40, n. 5, p. 2511–2526, abr. 2020.

RODRIGUES, R. R.; MCPHADEN, M. J. Why did the 2011-2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? *Geophysical Research Letters*, v. 41, n. 3, p. 1012–1018, 16 fev. 2014.

RODRIGUES, R. R.; WOOLLINGS, T. Impact of Atmospheric Blocking on South America in Austral Summer. *Journal of Climate*, v. 30, n. 5, p. 1821–1837, 1 mar. 2017.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.

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, 14 nov. 2012.

SHUKLA, S.; WOOD, A. W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, v. 35, n. 2, p. 1–7, 2008.

STAGGE, J. H.; TALLAKSEN, L. M.; GUDMUNDSSON, L.; VAN LOON, A. F.; STAHL, K. Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 13, p. 4027–4040, 15 nov. 2015.

TALLAKSEN, L. M.; VAN LANEN, H. *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. [s.l.] Elsevier, 2004.

TAUFIK, M.; TORFS, P. J. J. F.; UIJLENHOET, R.; JONES, P. D.; MURDIYARSO, D.; VAN LANEN, H. A. J. Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 6, p. 428–431, 2017.

THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial. *Mathematics*, v. 392, p.

387-, 1950.

TIJDEMAN, E.; BARKER, L. J.; SVOBODA, M. D.; STAHL, K. Natural and Human Influences on the Link Between Meteorological and Hydrological Drought Indices for a Large Set of Catchments in the Contiguous United States. *Water Resources Research*, v. 54, n. 9, p. 6005–6023, 5 set. 2018.

TRENBERTH, K. E.; DAI, A.; VAN DER SCHRIER, G.; JONES, P. D.; BARICHIVICH, J.; BRIFFA, K. R.; SHEFFIELD, J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 1, p. 17–22, 2014.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene. Maryland, EUA: 2006. Disponível em: . Acesso em: 10 jun. 2017.

VAN LANEN, H. A. J.; WANDERS, N.; TALLAKSEN, L. M.; VAN LOON, A. F. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 5, p. 1715–1732, 2 maio 2013.

VAN LOON, A. F. On the propagation of drought. How climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery. [s.l.] Wageningen University, 2013.

VAN LOON, A. F.; TIJDEMAN, E.; WANDERS, N.; VAN LANEN, H. A. J.; TEULING, A. J.; UIJLENHOET, R. How climate seasonality modifies drought duration and deficit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119, n. 8, p. 4640–4656, 27 abr. 2014.

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

VAN LOON, A. F.; GLEESON, T.; CLARK, J.; VAN DIJK, A. I. J. M.; STAHL, K.; HANNAFORD, J.; DI BALDASSARRE, G.; TEULING, A. J.; TALLAKSEN, L. M.; UIJLENHOET, R.; HANNAH, D. M.; SHEFFIELD, J.; SVOBODA, M.; VERBEIREN, B.; WAGENER, T.; RANGECROFT, S.; WANDERS, N.; VAN LANEN, H. A. J. Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, v. 9, n. 2, p. 89–91, 2 fev. 2016.

VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. J. A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 7, p. 1915–1946, 6 jul. 2012.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; ANGULO,

M.; EL KENAWY, A. A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901–2006) of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, v. 11, n. 4, p. 1033–1043, ago. 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 2, p. 318–332, fev. 2012.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 1 abr. 2010.

WANG, Y.; LI, J.; ZHANG, T.; WANG, B. Changes in drought propagation under the regulation of reservoirs and water diversion. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 138, n. 1–2, p. 701–711, 10 out. 2019.

WILHITE, D. A. Drought as a Natural Hazard. *Drought: A Global Assessment*, v. 1, p. 3–18, 2000.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, v. 10, n. 3, p. 111–120, 22 jan. 1985.

WILHITE, D. A.; PULWARTY, R. S. *Drought and Water Crises*. Second edition. | Boca Raton : CRC Press, 2018. | 1st edition published in 2005.: CRC Press, 2018.

WMO. *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes*. Geneva.

WOOD, E. F.; SCHUBERT, S. D.; WOOD, A. W.; PETERS-LIDARD, C. D.; MO, K. C.; MARIOTTI, A.; PULWARTY, R. S. Prospects for advancing drought understanding, monitoring, and prediction. *Journal of Hydrometeorology*, v. 16, n. 4, p. 1636–1657, 2015.

WU, J.; MIAO, C.; ZHENG, H.; DUAN, Q.; LEI, X.; LI, H. Meteorological and Hydrological Drought on the Loess Plateau, China: Evolutionary Characteristics, Impact, and Propagation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 123, n. 20, p. 11,569–11,584, 27 out. 2018a.

WU, J.; CHEN, X.; YAO, H.; LIU, Z.; ZHANG, D. Hydrological Drought Instantaneous Propagation Speed Based on the Variable Motion Relationship of Speed-Time

Process. *Water Resources Research*, v. 54, n. 11, p. 9549–9565, 29 nov. 2018b.

WU, J.; CHEN, X.; LOVE, C. A.; YAO, H.; CHEN, X.; AGHAKOUCHAK, A. Determination of water required to recover from hydrological drought: Perspective from drought propagation and non-standardized indices. *Journal of Hydrology*, v. 590, p. 125227, nov. 2020.

WU, J.; CHEN, X.; YUAN, X.; YAO, H.; ZHAO, Y.; AGHAKOUCHAK, A. The interactions between hydrological drought evolution and precipitation-streamflow relationship. *Journal of Hydrology*, v. 597, n. February, p. 126210, jun. 2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, maio 2016.

XU, Y.; ZHANG, X.; WANG, X.; HAO, Z.; SINGH, V. P.; HAO, F. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *Journal of Hydrology*, v. 579, n. September, p. 124147, dez. 2019.

YEVJEVICH, V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Journal of Hydrology*, v. 7, n. 3, p. 353, 1967.

YU, M.; LIU, X.; LI, Q. Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huaihe River basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 15, p. 17561–17570, 9 maio 2020.

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

ZENG, X.; ZHAO, N.; SUN, H.; YE, L.; ZHAI, J. Changes and relationships of climatic and hydrological droughts in the Jialing River basin, China. *PLoS ONE*, v. 10, n. 11, p. 1–14, 2015.

ZHOU, J.; LI, Q.; WANG, L.; LEI, L.; HUANG, M.; XIANG, J.; FENG, W.; ZHAO, Y.; XUE, D.; LIU, C.; WEI, W.; ZHU, G. Impact of climate change and land-use on the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the eastern Qilian Mountains. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 8, 2019.

ANEXO A –SÉRIES DE SPEI E SSI PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES

Figura A1 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 3 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias.

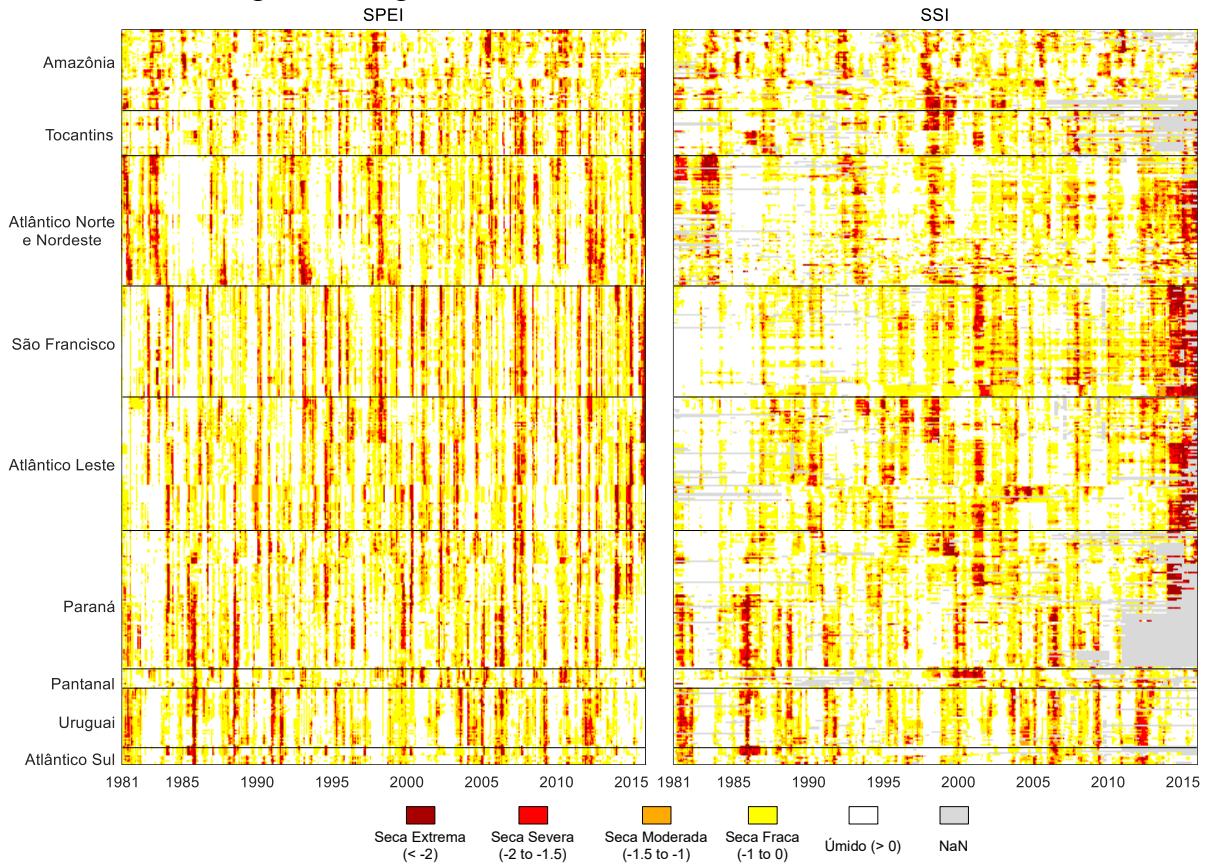


Figura A2 - Séries de SPEI e SSI para a escala de tempo de 12 meses. As séries foram ordenadas de acordo com as regiões hidrográficas das bacias.

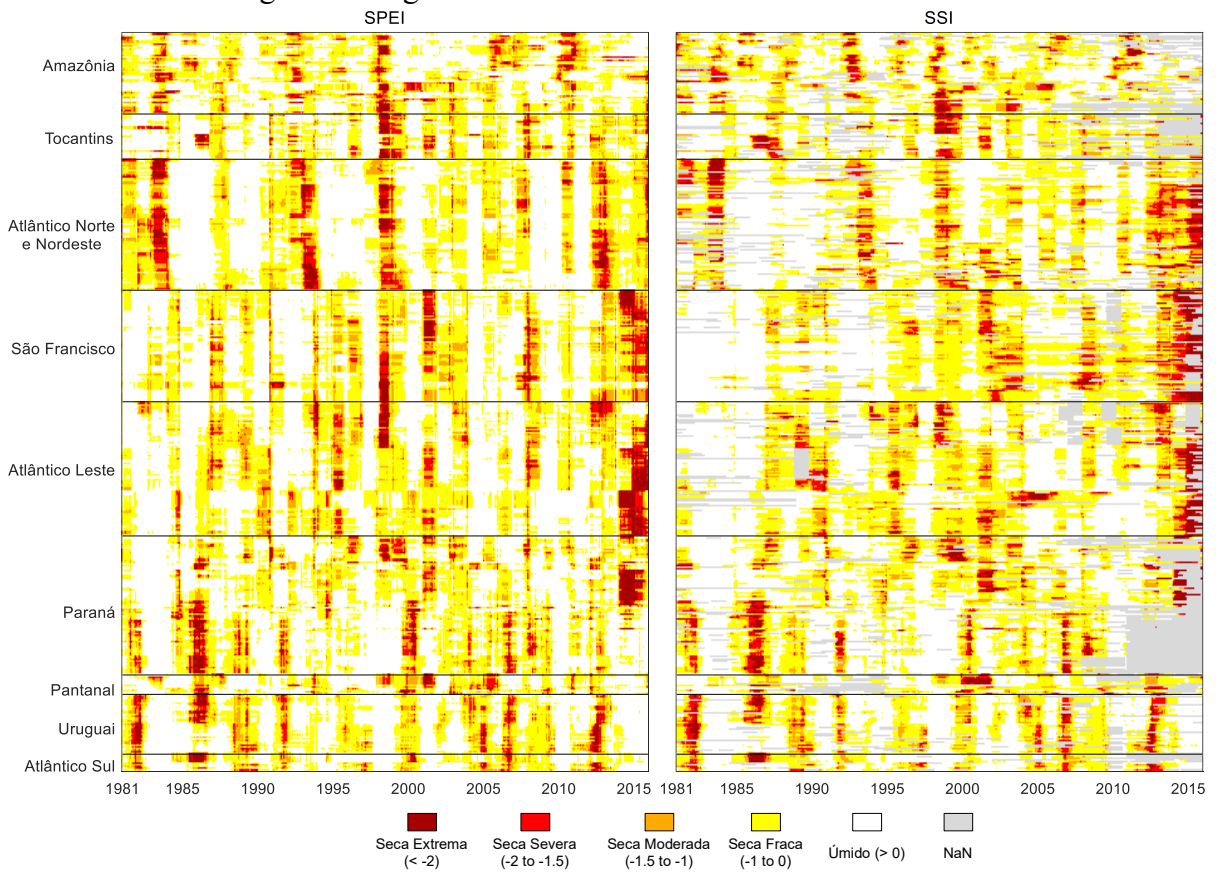


Figura A3 – Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 3 meses.

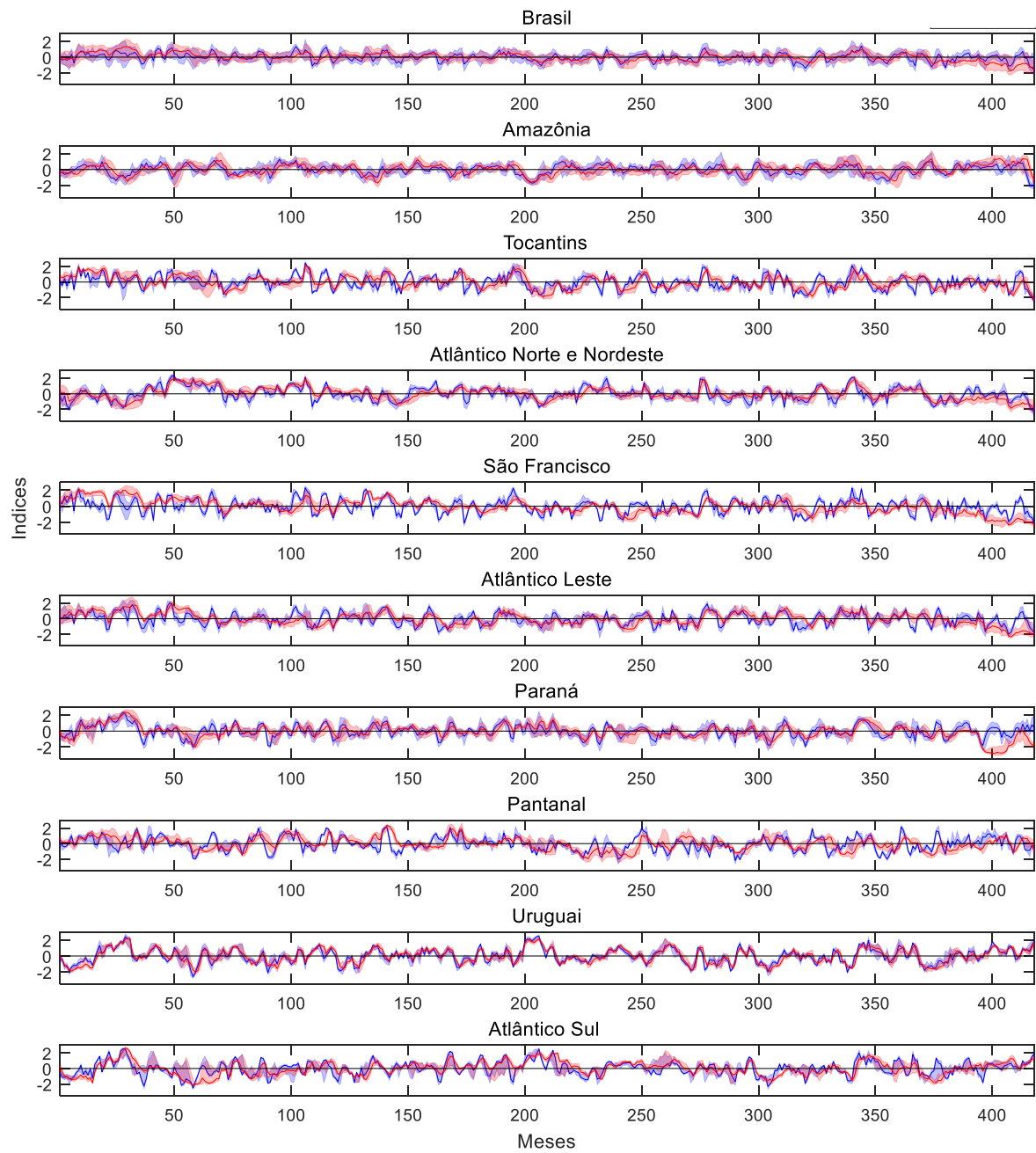
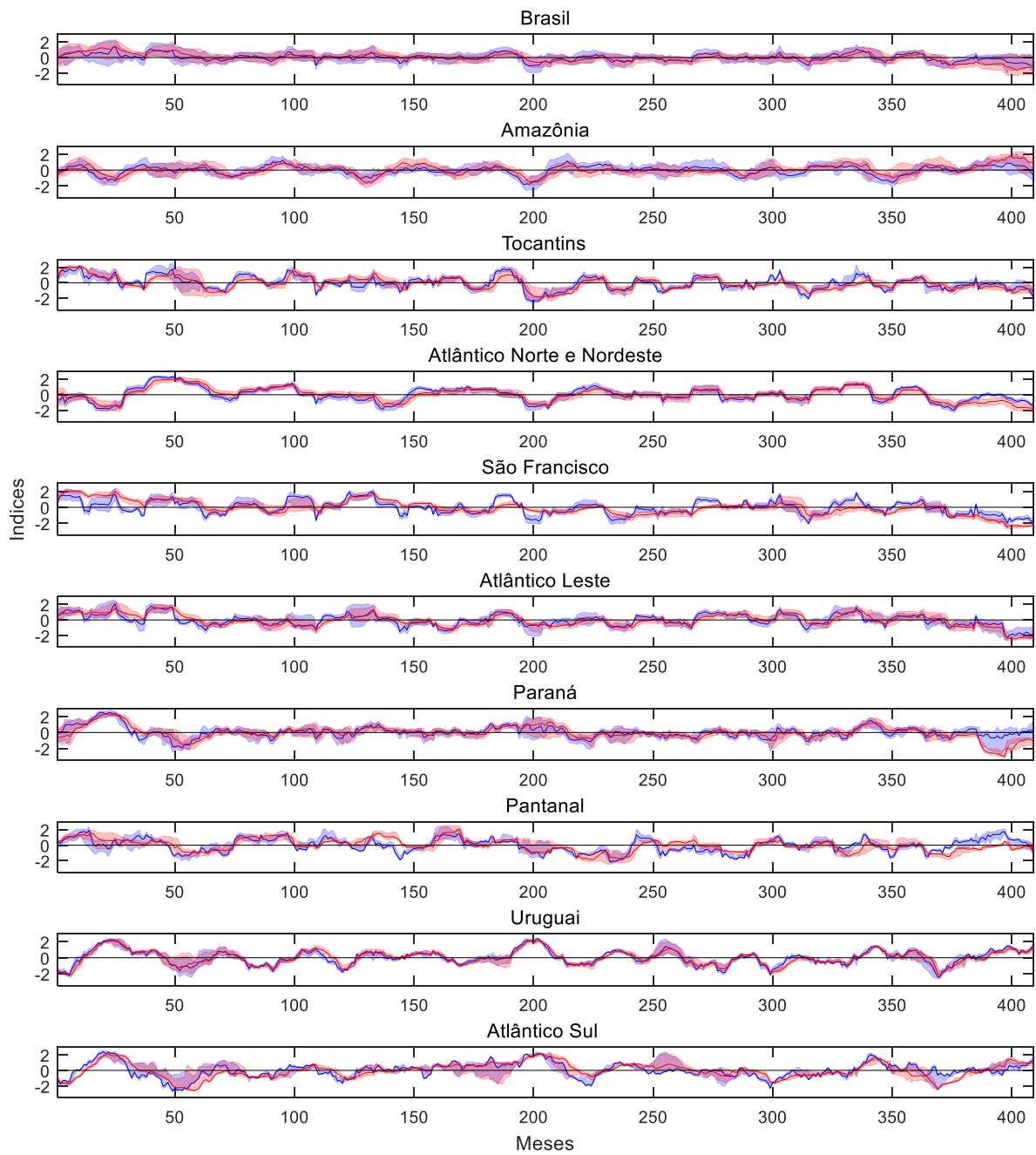


Figura A4 – Mediana das séries de SPEI (linha azul) e SSI (linha vermelha) e o intervalo interquartil (faixa azul e vermelha) associado para a escala de tempo de 12 meses.



ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DAS SECAS PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES

Figura B1 – (a) Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 3 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas. (b) Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 3 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A descrição do *boxplot* é a mesma da Figura 11.

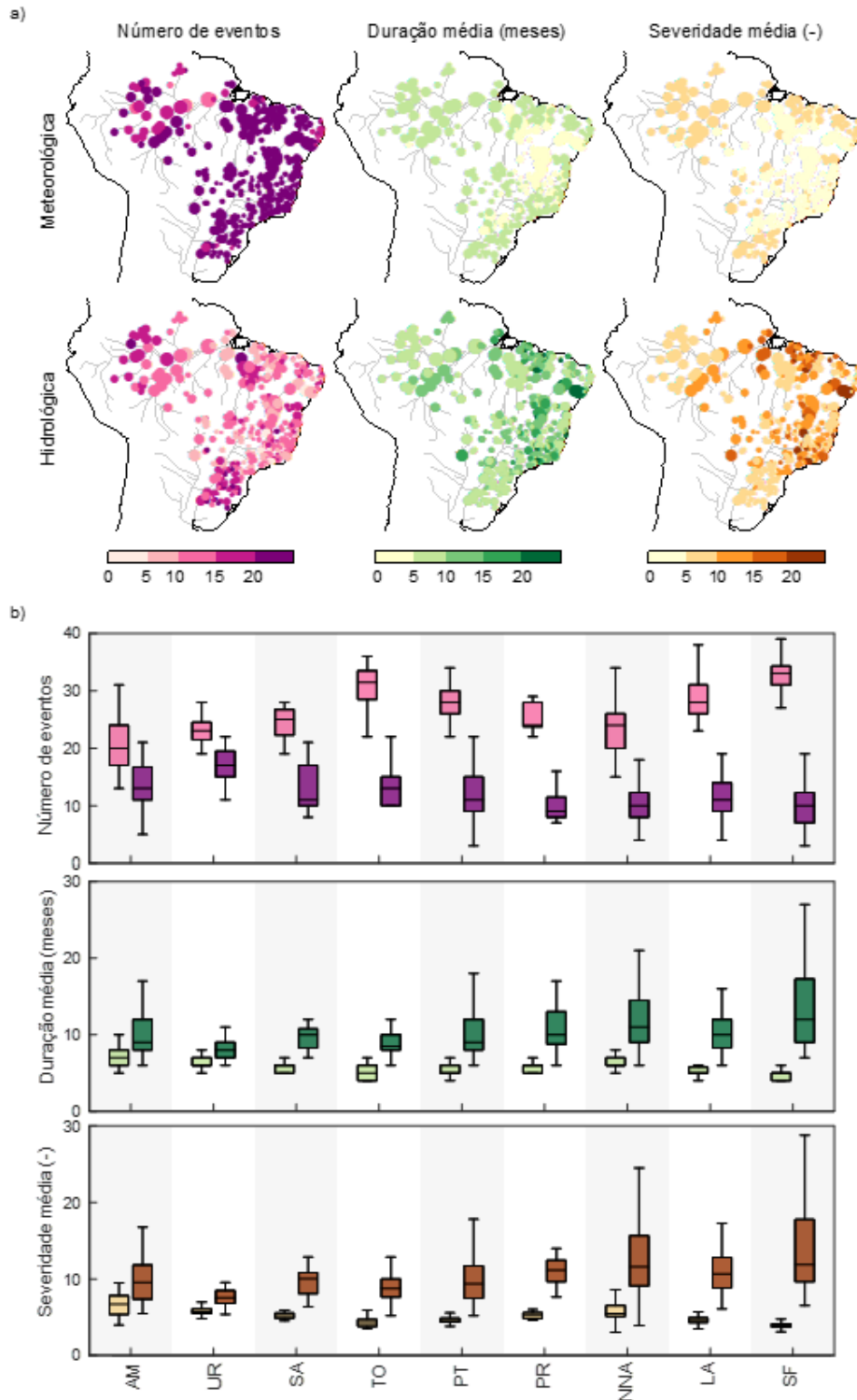
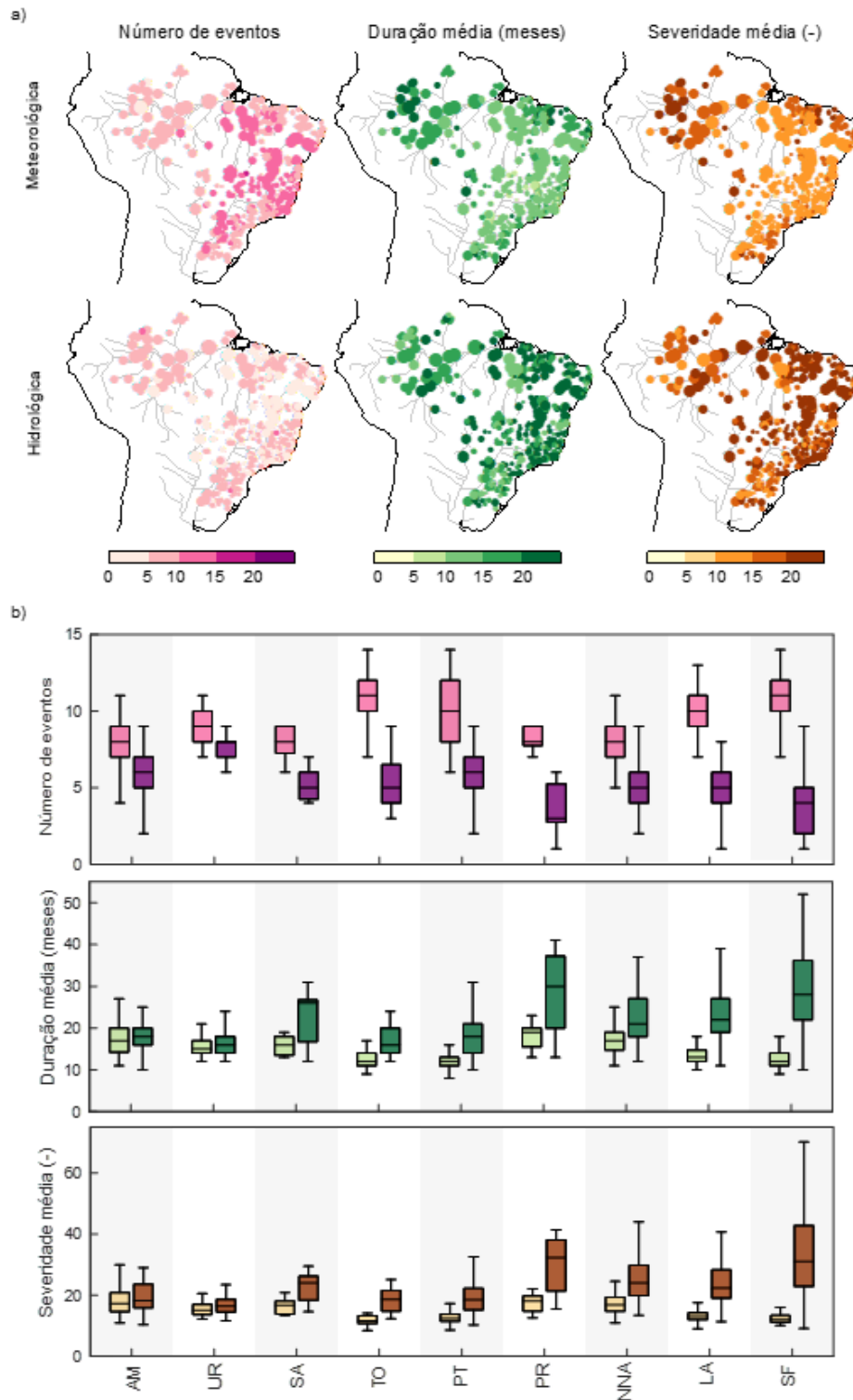


Figura B2 – (a) Distribuição do número de eventos, da duração e severidade média das secas meteorológicas e hidrológicas para escala de tempo de 12 meses. O tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias hidrográficas. (b) Características dos eventos de secas para o período de acumulação de 12 meses. As cores mais claras indicam as secas meteorológicas (SPEI) e as cores mais escuras as secas hidrológicas (SSI). A descrição do *boxplot* é a mesma da Figura 11.



ANEXO C – TEMPO DE RECUPERAÇÃO DAS SECAS PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES

Figura C1 - (a) $\bar{r}_{time,SPEI}$ e (b) $\bar{r}_{time,SSI}$ para a escala de tempo de 3 meses. (c) *Boxplot* do $\bar{r}_{time,SPEI}$ (cores claras) e $\bar{r}_{time,SSI}$ (cores escuras). (d) tx_r para 3 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do *boxplot* é a mesma da Figura 11.

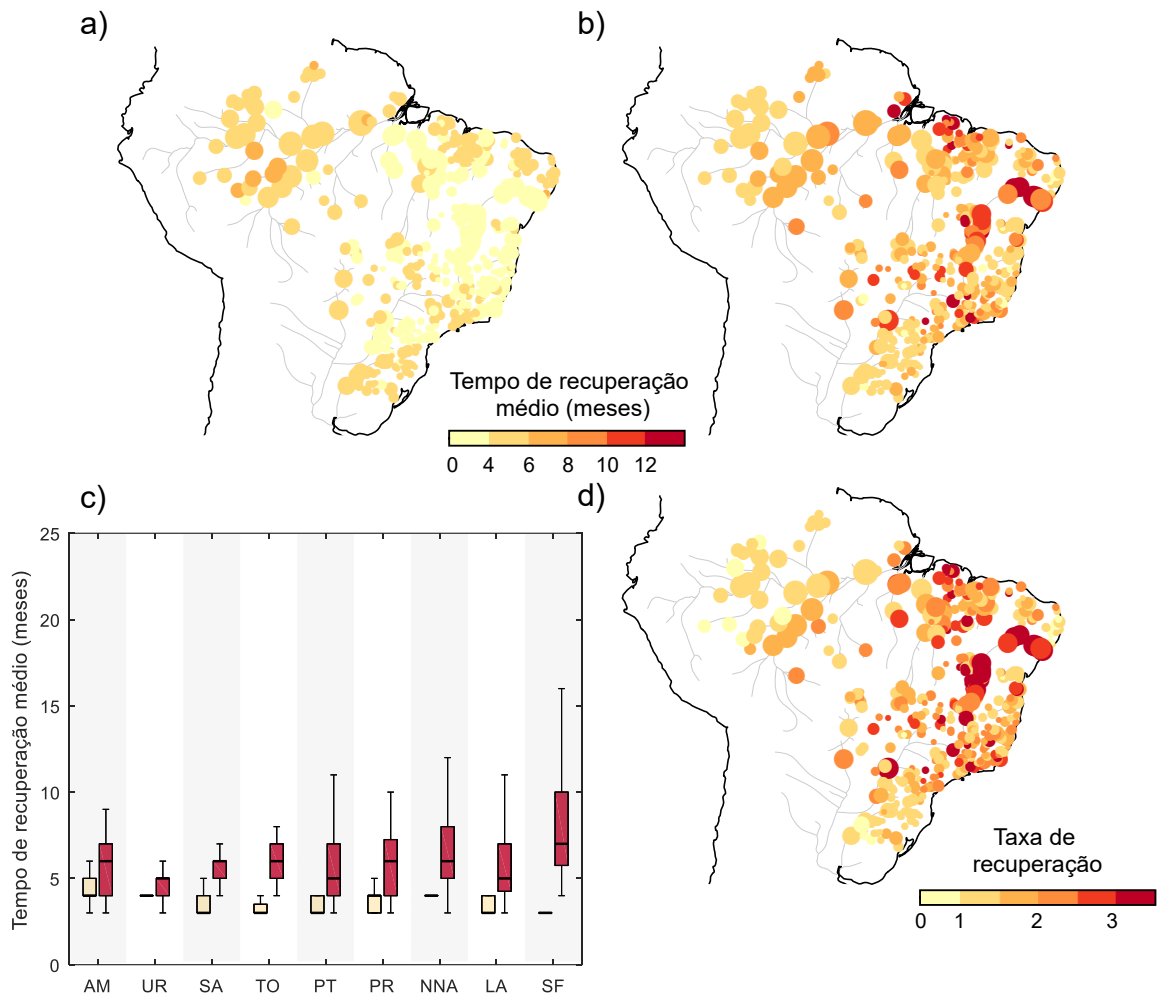
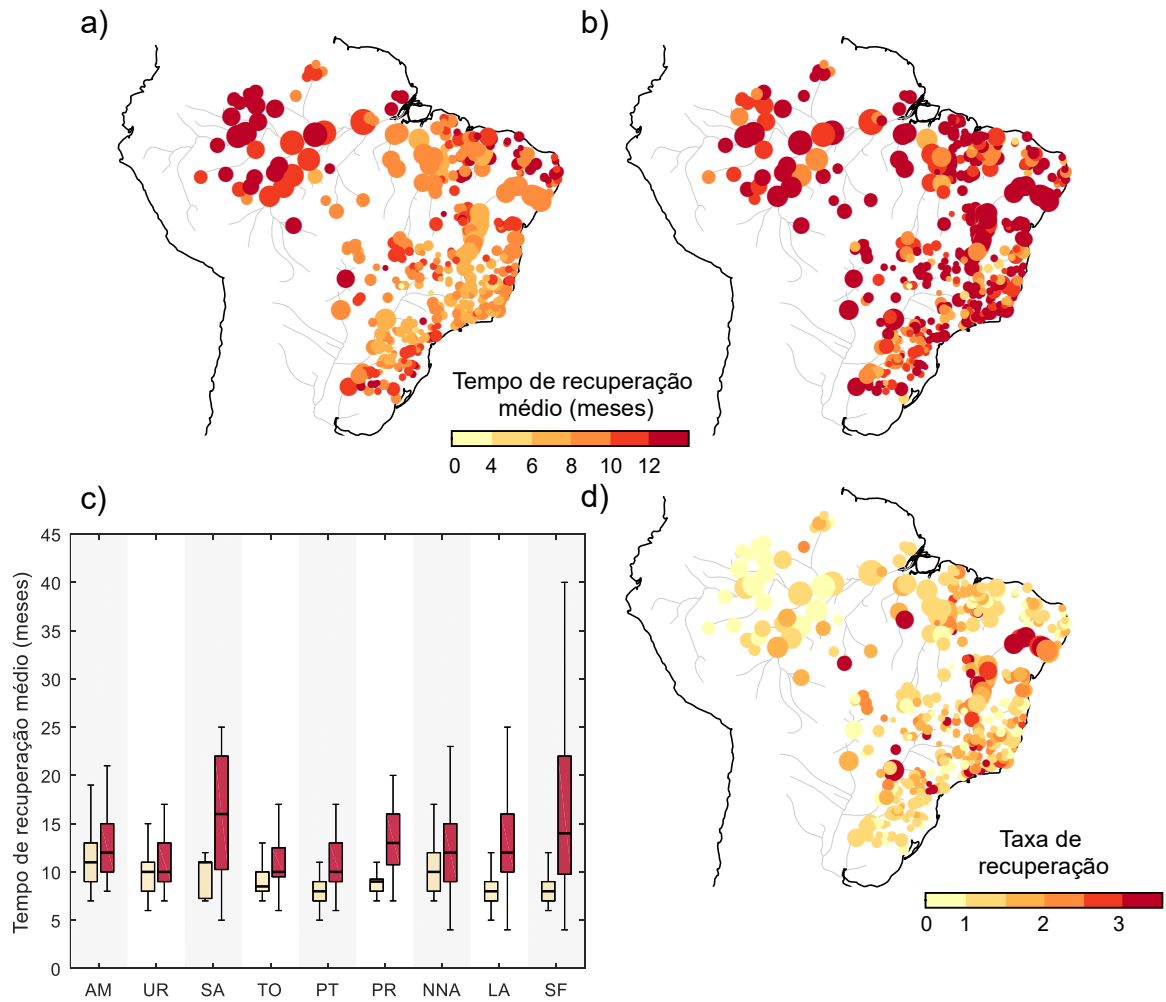


Figura C2 - (a) $\bar{r}_{time,SPEI}$ e (b) $\bar{r}_{time,SSI}$ para a escala de tempo de 12 meses. (c) *Boxplot* do $\bar{r}_{time,SPEI}$ (cores claras) e $\bar{r}_{time,SSI}$ (cores escuras). (d) tx_r para 12 meses de acumulação. O tamanho dos marcadores varia com o tamanho das bacias. A descrição do *boxplot* é a mesma da Figura 11.



ANEXO D – TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES

Figura D1 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 3 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.

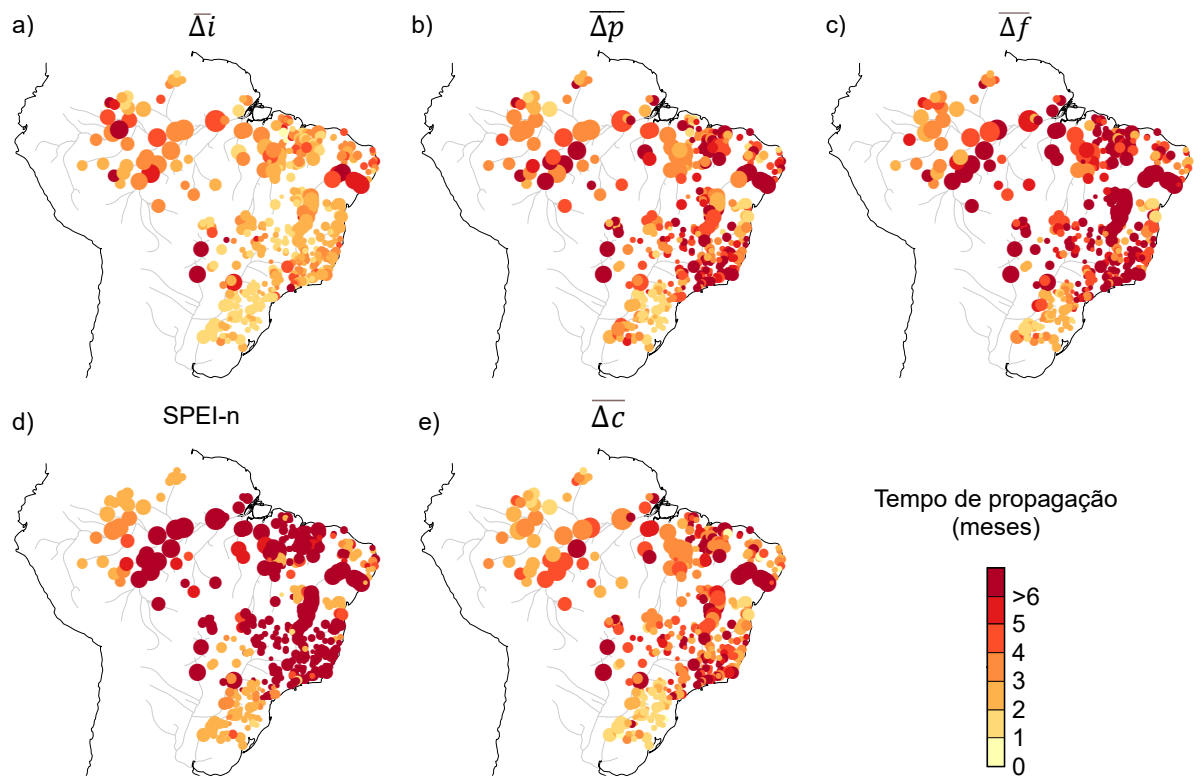
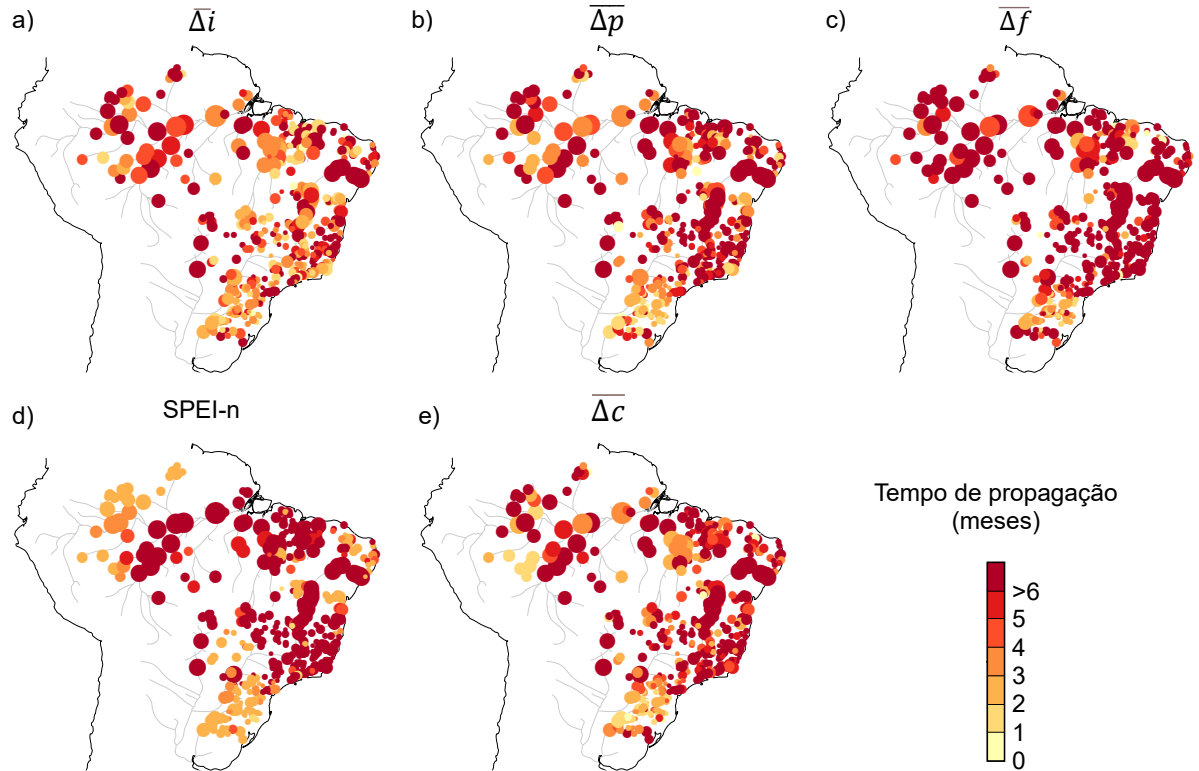


Figura D2 - Tempo de propagação para a diferença entre os (a) inícios, (b) picos e (c) finais dos eventos de secas. (d) SPEI-n, período de acumulação que possui a maior correlação com SSI-1. (e) Tempo de propagação para a diferença entre os centros de massas. A escala de tempo apresentada é de 12 meses e o tamanho dos marcadores varia de acordo com o tamanho das bacias.



ANEXO F – RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS DE SECA, DO TEMPO DE RECUPERAÇÃO E DOS INDICADORES DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO PARA AS ESCALAS DE TEMPO DE 3 E 12 MESES

Figura F1 - *Scatterplot* das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

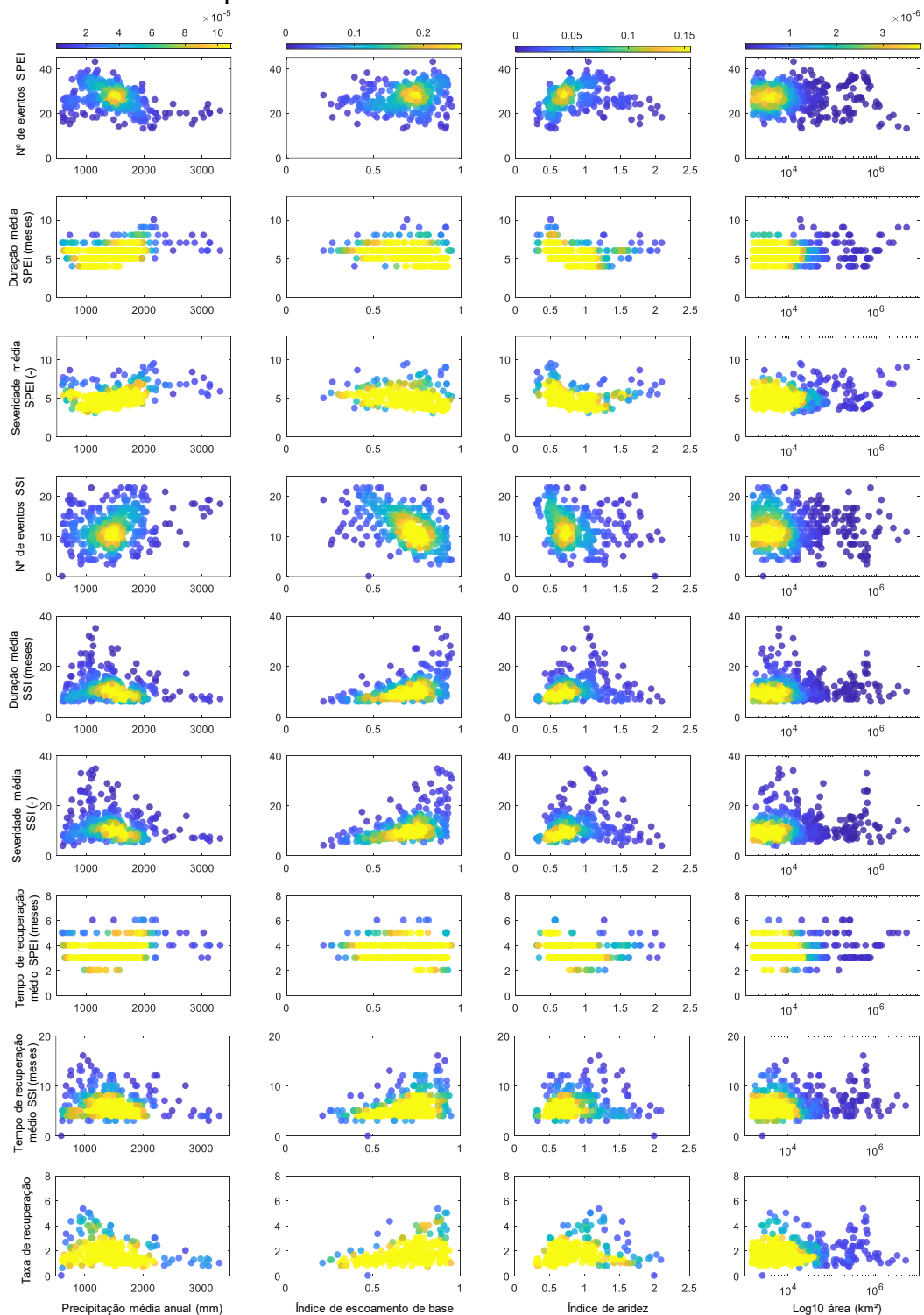


Figura F2 - *Scatterplot* das características dos eventos de seca e do tempo de recuperação pela precipitação média anual, pelo índice de aridez, pelo índice de escoamento de base e pela área da bacia. A escala de tempo das características dos eventos de secas e o tempo de recuperação é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

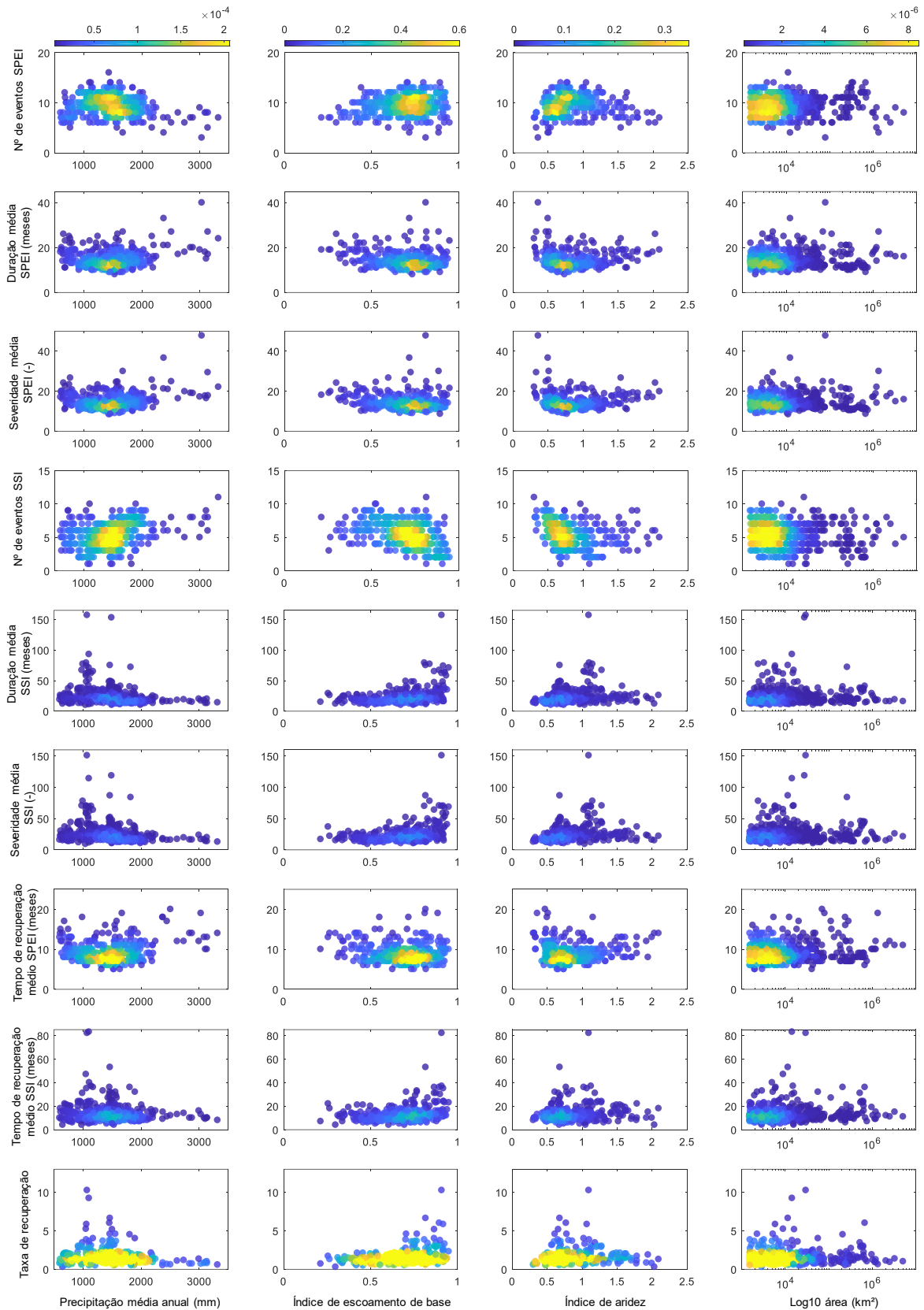


Figura F3 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

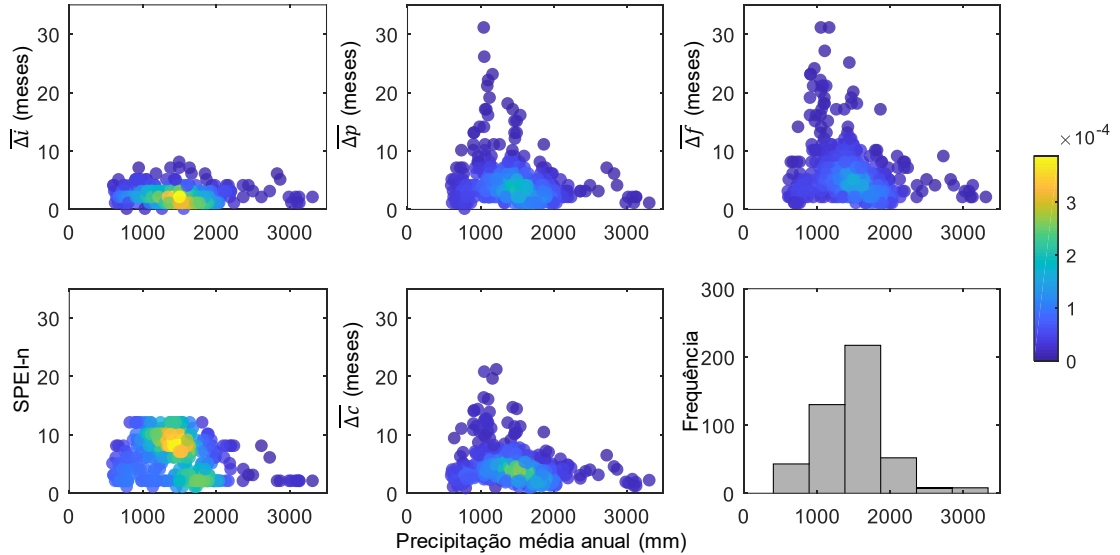


Figura F4 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela precipitação média anual e o histograma da precipitação média anual. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

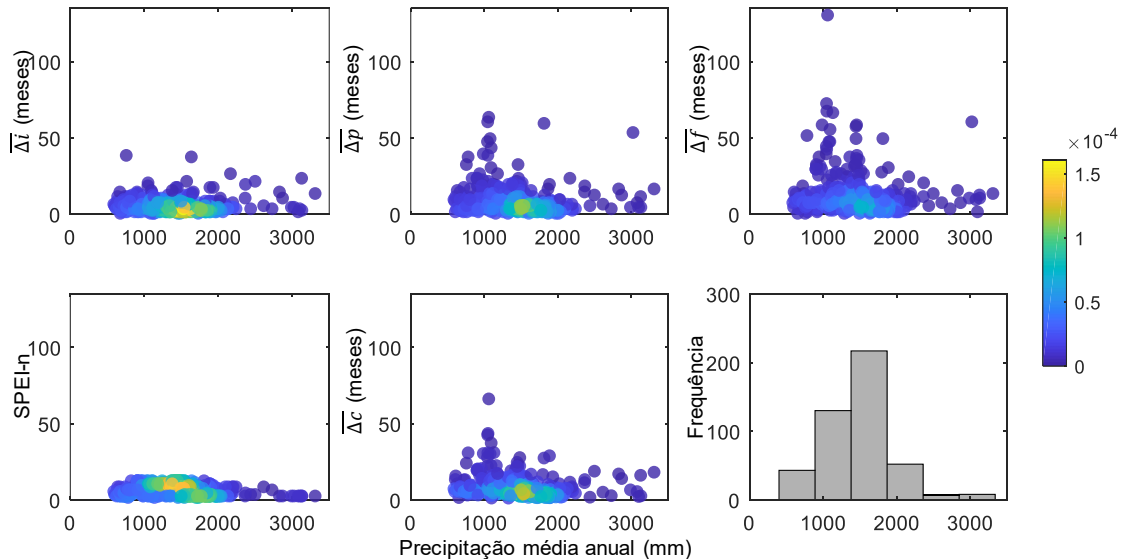


Figura F5 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

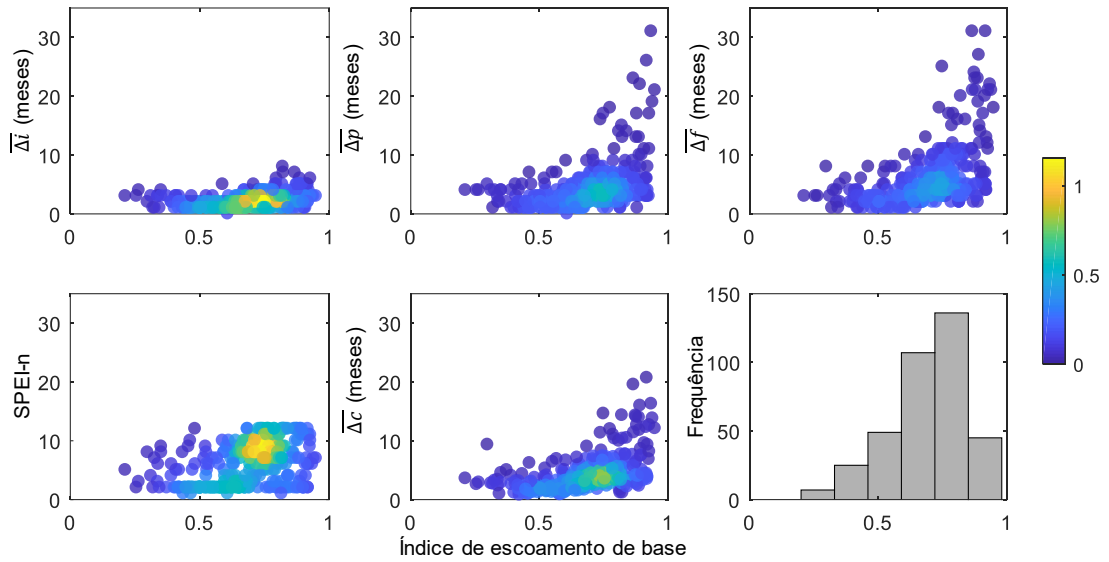


Figura F6 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de escoamento de base e o histograma do índice de escoamento de base. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

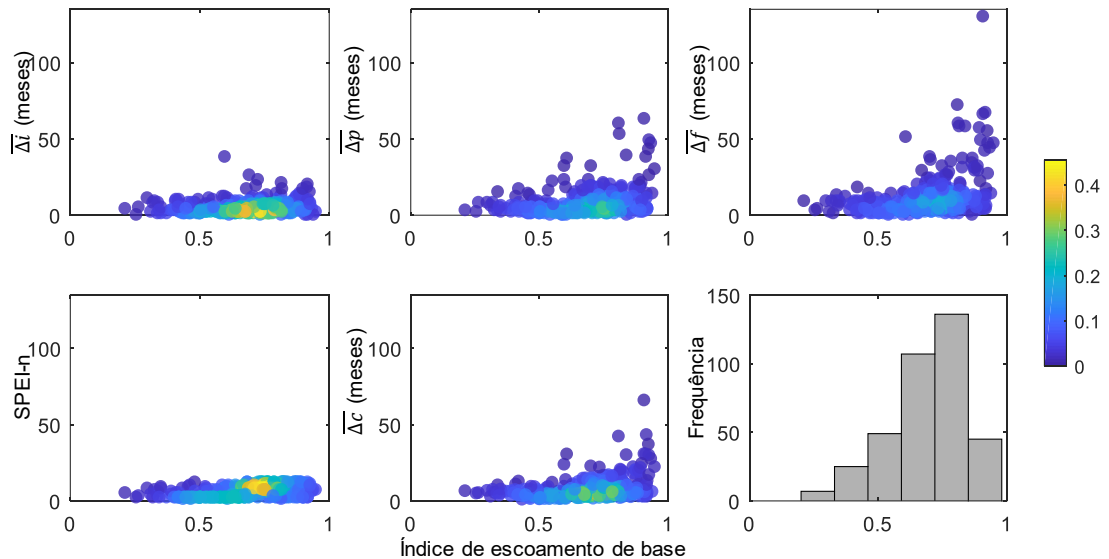


Figura F7 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta i}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

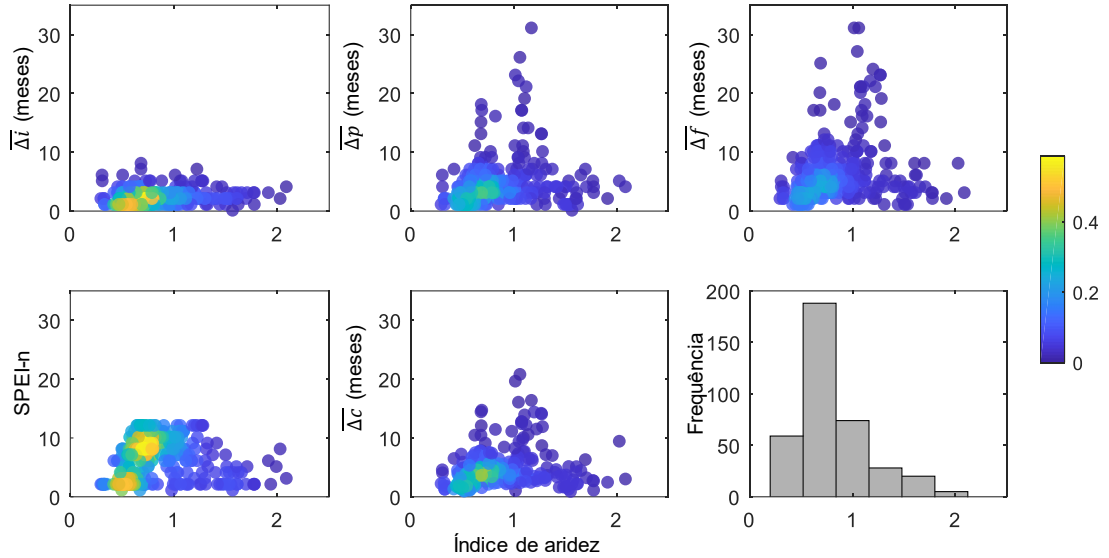


Figura F8 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo índice de aridez e o histograma do índice de aridez. A escala de tempo do $\overline{\Delta i}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

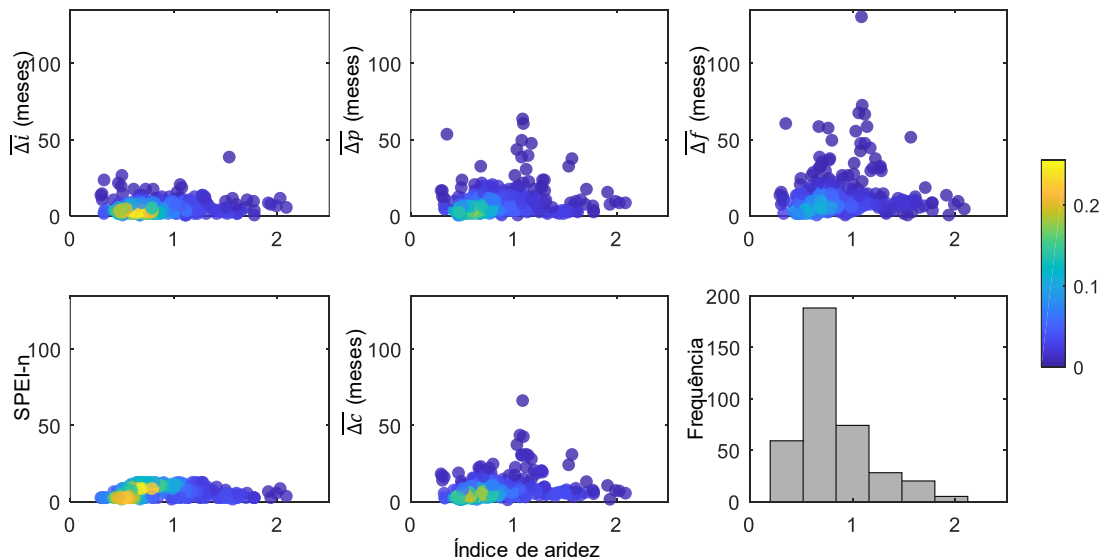


Figura F9 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma das áreas das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

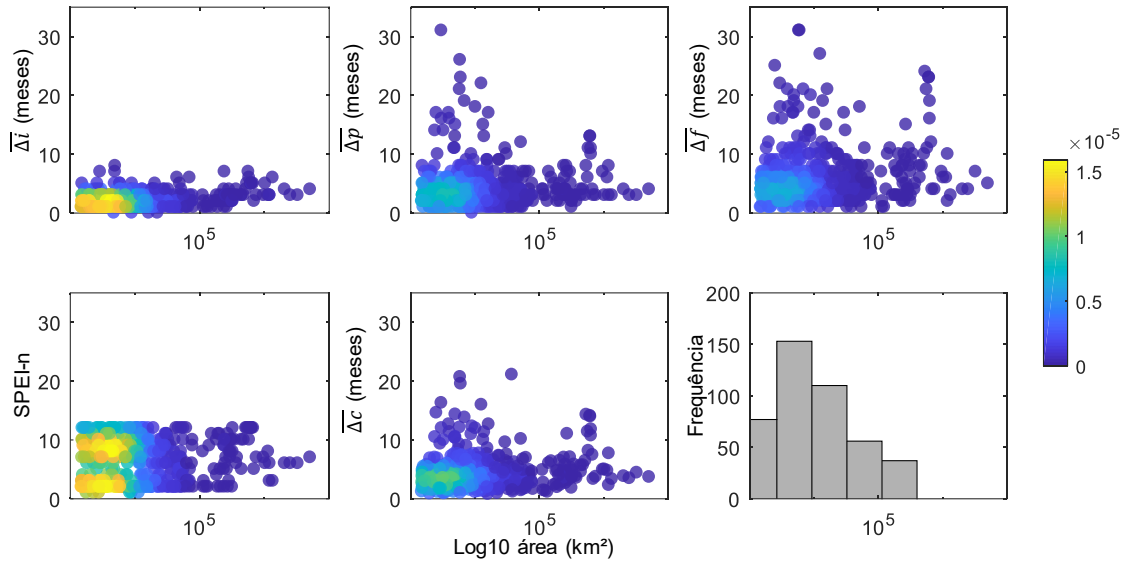


Figura F10 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pela área da bacia e o histograma das áreas das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta t}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

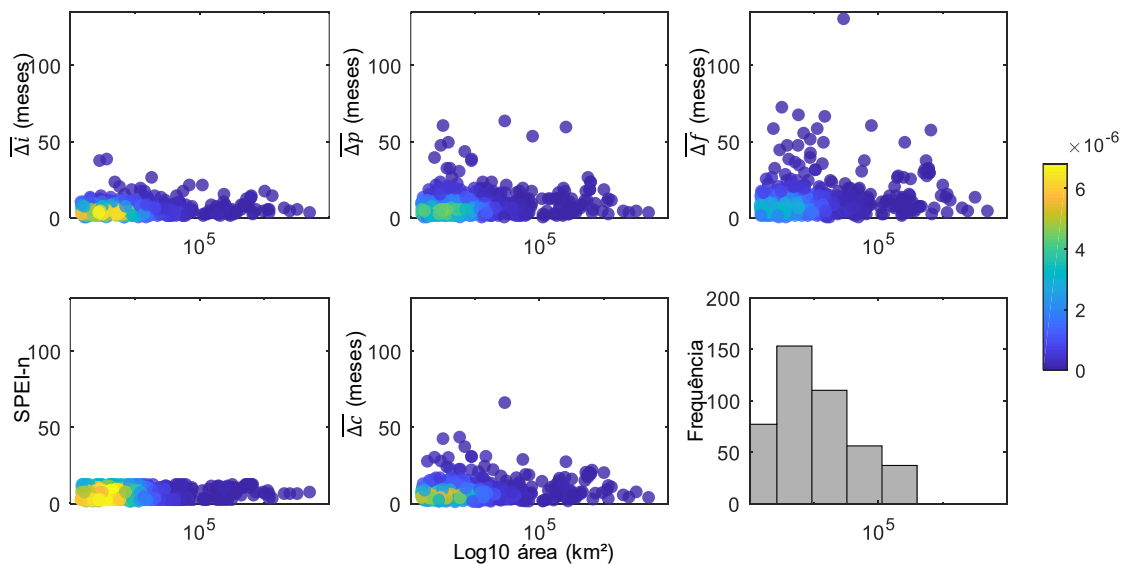


Figura F11 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização das bacias e o histograma do grau de regularização das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta i}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 3 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

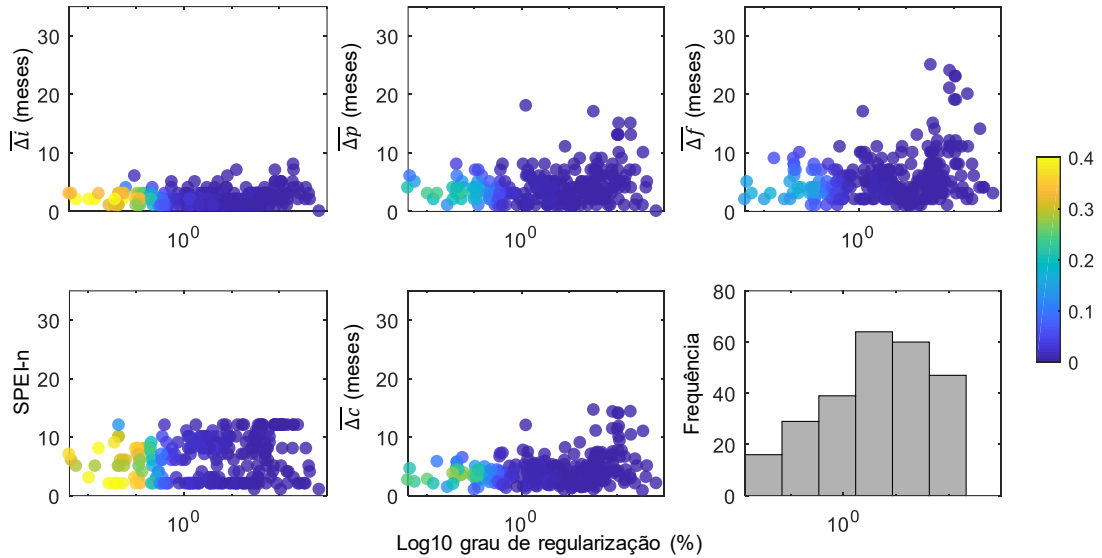


Figura F12 - *Scatterplot* dos indicadores do tempo de propagação pelo grau de regularização das bacias e o histograma do grau de regularização das bacias. A escala de tempo do $\overline{\Delta i}$, $\overline{\Delta p}$, $\overline{\Delta f}$ e $\overline{\Delta c}$ é de 12 meses. As cores representam a densidade estimada de Kernel.

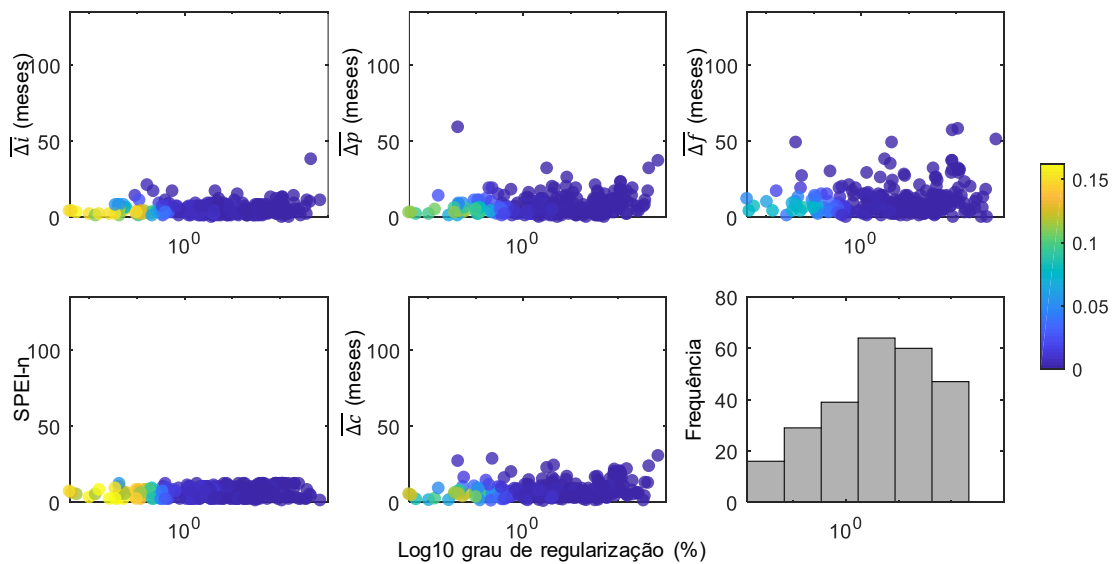


Figura F13 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 3 meses. Número de eventos, duração média, severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).

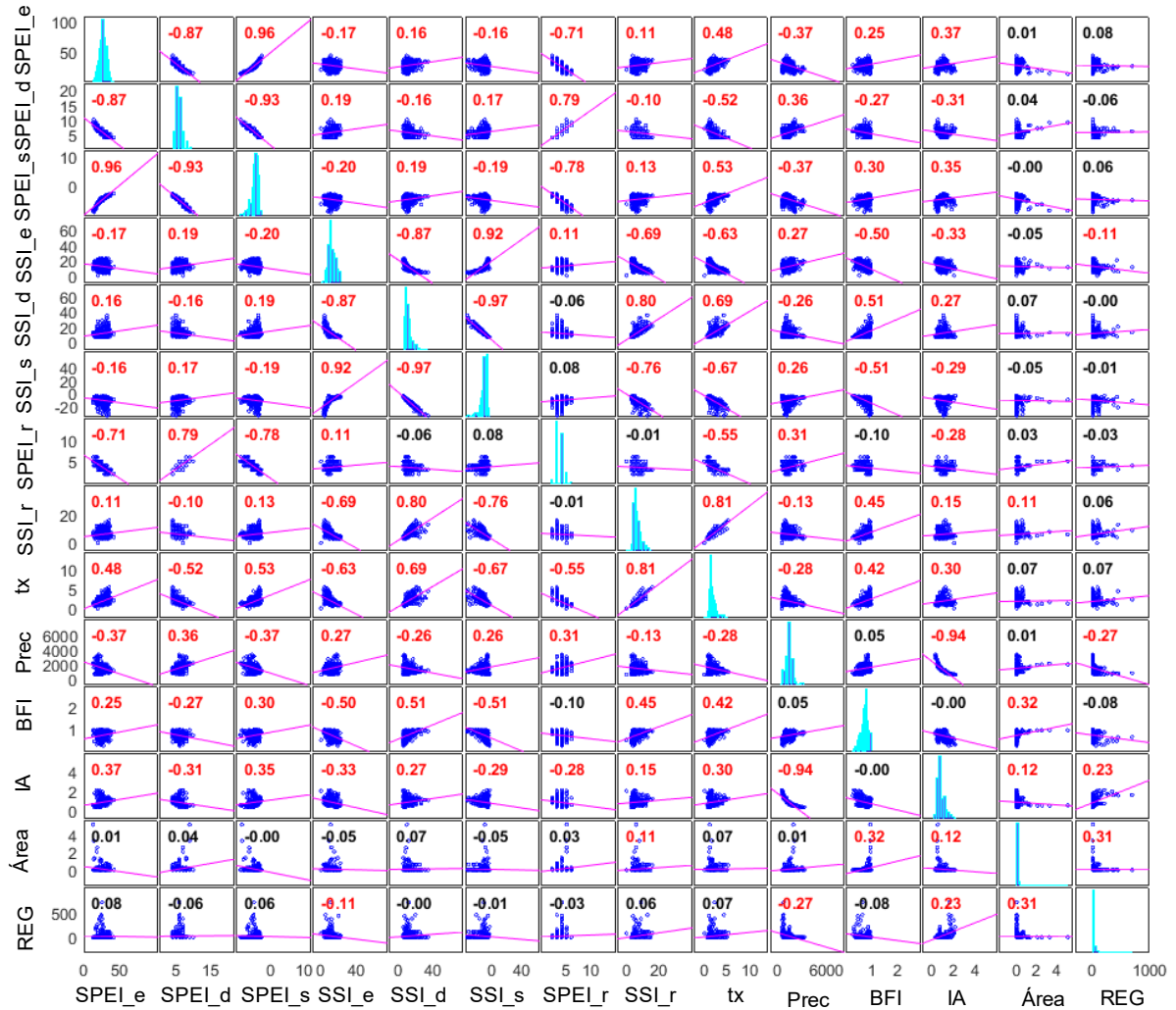


Figura F14 – Correlação de Spearman entre as características dos eventos de secas e das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 12 meses. Número de eventos, duração média, severidade média das secas meteorológicas (SPEI_e, SPEI_d e SPEI_s). Número de eventos, duração média, severidade média das secas hidrológicas (SSI_e, SSI_d e SSI_s). Tempo de recuperação do SPEI, SSI e a taxa de recuperação (SPEI_r, SSI_r e tx). Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).

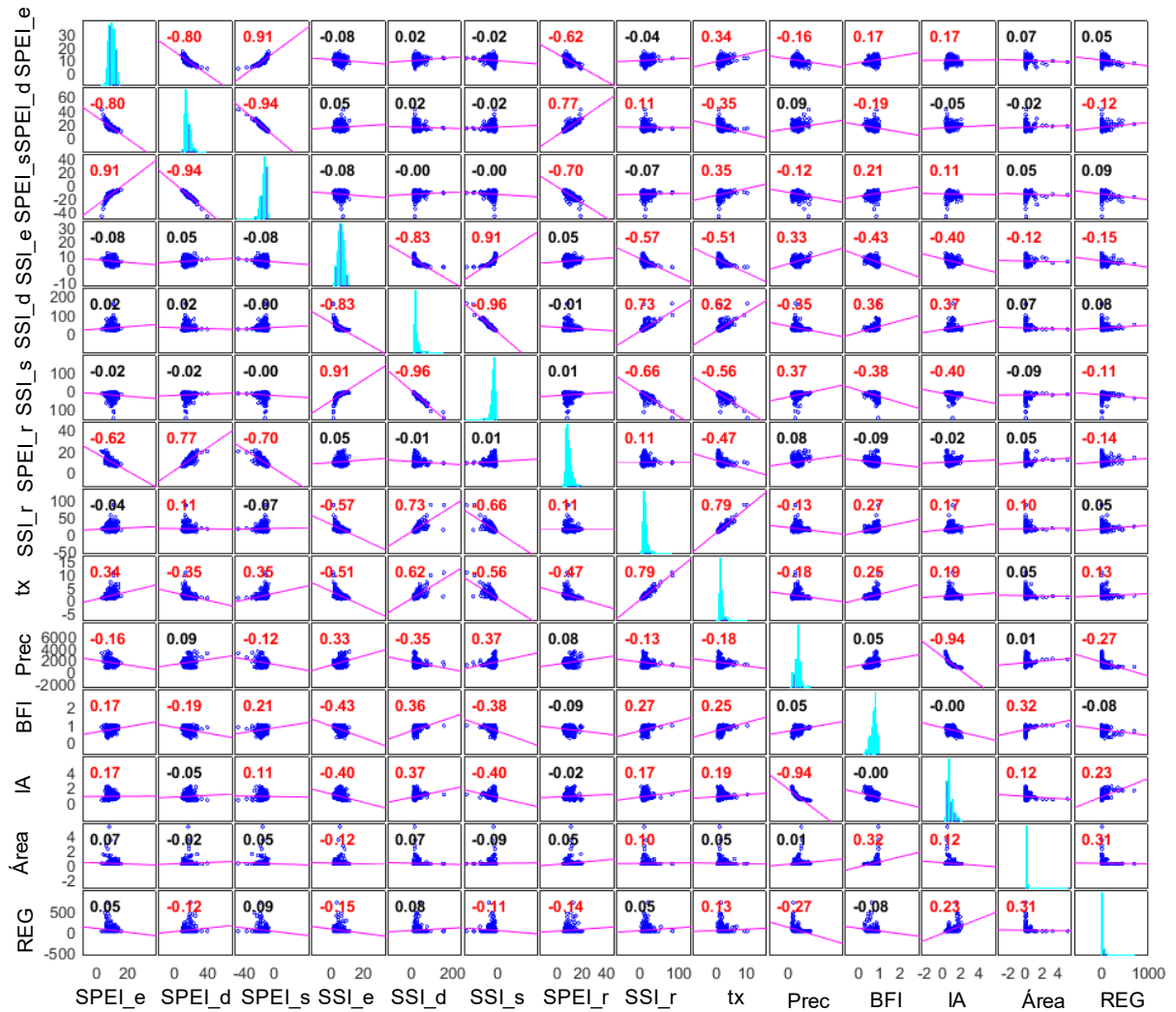


Figura F15 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 3 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).

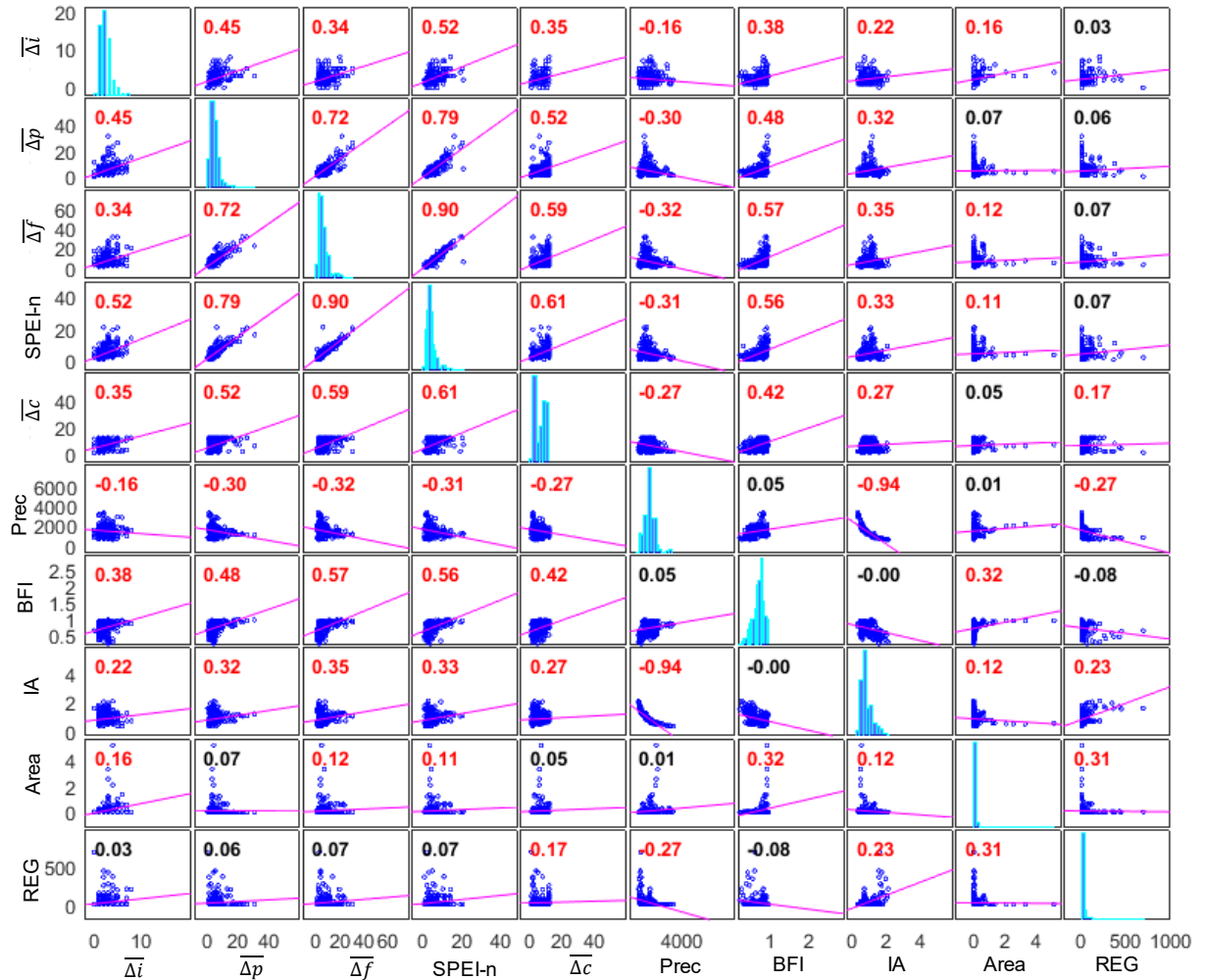


Figura F15 – Correlação de Spearman para os indicadores do tempo de propagação e as características das bacias. Em vermelho são as correlações significativamente diferentes de zero para um nível de confiança de 0,05. A escala de tempo utilizada é de 12 meses. Precipitação média anual, índice de escoamento de base, índice aridez e o grau de regularização (Prec, BFI, IA e REG).

