PROPAGAÇÃO DE SECAS METEOROLÓGICAS PARA SECAS HIDROLÓGICAS NO SUL DO BRASIL

Vinícius Bogo Portal Chagas [1]; Alena Gonzalez Bevacqua[2]; & Pedro Luiz Borges Chaffe[3]

ABSTRACT – The effects of meteorological droughts propagate through the hydrological system, possibly producing hydrological droughts. This propagation determines the vulnerability of a region to droughts and it can be used as an early warning system. In Southern Brazil (SB), the propagation from meteorological to hydrological drought has been little explored. In this work, we verify how much time does it take for a meteorological drought to produce a hydrological drought in Southern Brazil. Additionally, we verify if this information can be used as a hydrological drought forecast. We evaluated the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and the Standardized Streamflow Index (SSI) of 112 basins in SB, from 1980 to 2013. The relationship between meteorological and hydrological drought was examined by cross-correlating the SPEI and SSI series. Results showed that the propagation time in SB ranged from one to five months. However, it is expected that, in most of the basins, a two-month meteorological drought leads to strong effects on the streamflow. In the southern part of SB (i.e., Rio Grande do Sul) the effects of meteorological droughts on the streamflow are more persistent and can be felt after a single month. High correlation values of the SPEI with the lagged SSI in the southern part of SB demonstrate that the SPEI series are a potential source for early warning of hydrological droughts. This knowledge indicates that standardized indices might be used as early warning systems for drought events help monitoring and mitigating those events.

Palavras-Chave – Secas, Sul do Brasil, SPEI.

1 - INTRODUÇÃO

Secas ocorrem quando a disponibilidade hídrica é insuficiente para atender as demandas das atividades humanas ou do meio ambiente (Wilhite e Pulwarty, 2018). Se tratam de eventos sem uma definição universal, uma vez que as demandas hídricas dependem da região, do período, e das variáveis analisadas (Van Loon, 2015). Para melhor definir eventos de seca, estas são classificadas em quatro categorias (Wilhite e Glatnz, 1985): (i) seca meteorológica, quando há deficiência de chuvas e possivelmente o aumento da evapotranspiração; (ii) seca edáfica,

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, e-mail: vbchagas@gmail.com.
2) Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC.
3) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC.

relacionada à umidade do solo; (iii) seca hidrológica, com anomalias negativas nas águas superficiais e subsuperficiais; e (iv) seca socioeconômica, relacionada às demandas da sociedade.

Anomalias negativas nas chuvas se propagam lentamente pelo sistema hidrológico e podem se tornar uma seca hidrológica. A relação entre deficiência nas chuvas e na vazão dos rios é controlada pelas características fisiográficas das bacias e pelas atividades antrópicas (Van Loon *et al.*, 2016). Por exemplo, a propagação de secas meteorológicas para hidrológicas pode ser menos intensa (i.e., as secas podem ser atenuadas) em bacias com aquíferos de alta produtividade (Barker *et al.*, 2016), com alta capacidade de armazenamento da água (Van Loon e Laaha, 2015), ou com a presença de reservatórios (Melo *et al.*, 2016).

No Sul do Brasil, secas meteorológicas são causadas por fatores climáticos como o La Niña Leste (Tedeschi *et al.*, 2015), bloqueios atmosféricos associados à oscilação de Madden-Jullian (Rodrigues e Woolings, 2016), entre outros. Porém, o efeito destas secas meteorológicas na vazão não é espacialmente homogêneo no Sul do Brasil, uma vez que a propagação da seca difere em função das características de cada bacia. Apesar de haver grande quantidade de dados de chuva e vazão, a propagação das secas é pouco estudada no Sul do Brasil. Um melhor entendimento sobre este processo é uma oportunidade para melhor prever, mitigar, e avaliar a vulnerabilidade a eventos de secas hidrológicas.

Os objetivos deste trabalho são (i) identificar qual é o tempo de propagação para que uma seca meteorológica vire uma seca hidrológica no Sul do Brasil; e (ii) verificar se as ocorrências das secas meteorológicas podem ser usadas para a previsão de secas hidrológicas no Sul do Brasil. Para isto, foram utilizados dados de vazão, chuva, e evapotranspiração mensal de 112 bacias hidrográficas, no período de 1980 a 2013. O Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI) e o Índice de Vazão Padronizado (SSI) foram utilizados para a identificação das relações entre as secas meteorológicas e hidrológicas.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Base de dados

Foram usados dados mensais de chuva, evapotranspiração, e vazão para o Sul do Brasil. Os dados de chuva e evapotranspiração usados são disponibilizados por Xavier *et al.* (2016) para o período de janeiro de 1980 a dezembro de 2013. São dados mensais calculados a partir das estações de medição disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Xavier *et al.*, 2016). Segundo Xavier *et al*. (2016), a evapotranspiração foi calculada pelo método de Penman-Monteith, que considera as variáveis temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, e irradiação solar. Os dados de chuva e evapotranspiração são formados por um grid com resolução espacial de 0,25° (aproximadamente 28 km na linha do equador).

Para vazão, foram utilizados dados diários fornecidos pela página do HidroWeb (ANA, 2018). Estes dados diários foram transformados em médias mensais, sendo que os meses com mais que 33% de dias com ausência de dados foram desconsiderados. Apenas as bacias hidrográficas com mais de 70% dos dados disponíveis entre 1980 e 2013 foram utilizadas. Além disso, devido à resolução espacial dos dados de chuva e evapotranspiração, apenas as bacias hidrográficas com mais de 1500 km² de extensão foram consideradas. A delimitação das bacias se deu com os dados altimétricos do SRTM (USGS, 2016), de resolução horizontal de 30 metros. Com isso, foram utilizadas 112 bacias hidrográficas na análise.

2.2 - SPEI e SSI

As secas meteorológicas de cada bacia hidrográfica foram analisadas com o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI; Vicente-Serrano *et al*., 2010). O SPEI é largamente utilizado para o cálculo de anomalias no balanço de chuva e evapotranspiração em várias escala de tempo. É um índice robusto e de rápida e fácil computação (Vicente-Serrano *et al*., 2010). Para calcular o SPEI, o primeiro passo é fazer a diferença entre os dados mensais de precipitação e de evapotranspiração da bacia. O segundo passo é fazer somas móveis destas diferenças, sendo que neste trabalho foram utilizadas somas móveis na escala de tempo de 1 a 24 meses. O terceiro passo é ajustar as somas móveis de cada escala de tempo para uma distribuição de três parâmetros. Foi adotada a distribuição generalizada de valores extremos (GEV) segundo recomendado por Stagge *et al.* (2015). O último passo é multiplicar a função GEV acumulada pelo inverso da distribuição normal. Com isso, a série do SPEI possui média zero, distribuição gaussiana, e valores positivos em períodos úmidos e negativos em períodos secos. Períodos de acumulação do SPEI foram nomeados como SPEI-1 quando se refere à escala de tempo de um mês, SPEI-2 quando se refere à somas móvel de dois meses, SPEI-3 de três meses, etc.

As secas hidrológicas das bacias foram avaliadas usando o Índice de Vazão Padronizado (SSI), que é calculado usando os mesmos princípios do SPEI, porém considerando apenas a vazão mensal (Barker *et al*., 2016). A distribuição utilizada também foi a GEV, segundo recomendado por Vicente-Serrano *et al.* (2012). Foi feita uma análise exploratória onde todas as séries das 112 bacias foram verificadas visualmente a fim de encontrar eventuais erros nas séries de dados.

2.3 - Propagação das secas

Para verificar o tempo de propagação das secas meteorológicas para secas hidrológicas foram feitas correlações entre as séries de SSI e SPEI. Para cada bacia hidrográfica, foram feitas correlações cruzadas entre o SSI-1 e o SPEI-1 até o SPEI-24. A correlação utilizada foi a de Pearson. A escala de tempo considerada para o SSI foi de apenas um mês pois é semelhante à vazão média de uma média móvel de 30 dias, considerado representativo para vazões baixas. O período de acumulação do SPEI com a maior correlação com o SSI-1 foi denominado de SPEI-n e foi usado

como um indicador do tempo de propagação da seca. Portanto, se o SSI-1 teve maior correlação com o SPEI em uma baixa escala de tempo, considera-se que o tempo de propagação da seca na bacia é baixo. Para que a correlação cruzada não tenha valores espúrios, as séries correlacionadas devem ser estacionárias (Chatfield, 2003). Para isso, a tendência linear na média foi identificada e removida das séries de SSI e SPEI usando a declividade de Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1978).

Também há a possibilidade de uma seca hidrológica ocorrer com alguns meses de atraso após a ocorrência da seca meteorológica. Portanto, para determinar se há um atraso na propagação da seca, as correlações cruzadas também foram calculadas entre o SPEI e o SSI-1 deslocado em um, dois, e três meses no tempo.

A Figura 1 exemplifica a relação entre SSI e SPEI para a série do rio Goio-Erê, no estado do Paraná. A série de SSI-1 calculada para esta bacia é sobreposta a duas séries de SPEI: SPEI-1 e SPEI-5. Visualmente, nota-se que alguns eventos de seca da série de SPEI-1 não se propagaram para a vazão (e.g. entre os meses 30 e 50). A série de SSI-1 se aproxima melhor da série de SPEI-5 (correlação igual a 0,77) que da série de SPEI-1 (correlação igual a 0,52). De fato, o SPEI-5 teve a maior correlação entre todas as escalas de tempo de SPEI, portanto o tempo de propagação de uma seca meteorológica para hidrológica nesta bacia é igual a cinco meses.

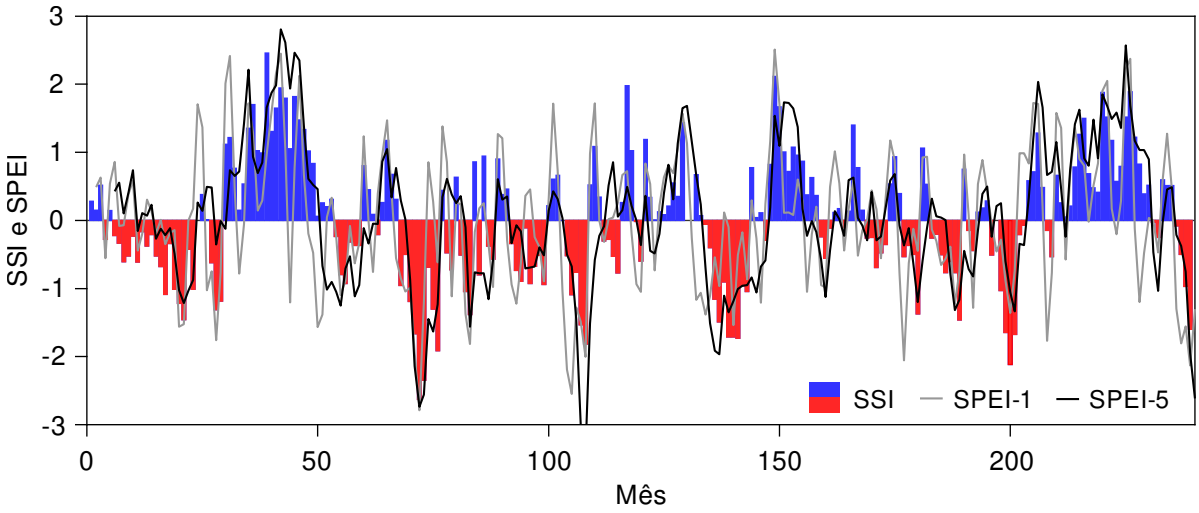

Figura 1 – Exemplo da série de SSI-1, SPEI-1, e SPEI-5 da bacia do rio Goio-Erê (código: 64815000), afluente do rio Piquiri, no estado do Paraná. A série inicia em janeiro de 1980 e termina em dezembro de 2000.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As correlações cruzadas de todas as 112 bacias analisadas estão representadas em um mapa de calor na Figura 2. Os resultados indicam que na maior parte do Sul do Brasil o tempo de propagação para que uma seca meteorológica vire uma seca hidrológica é de dois meses. Isto mostra que as secas no Sul do Brasil não se propagam muito rapidamente, uma vez que em outras regiões do mundo (e.g. Grã-Bretanha, Barker *et al.*, 2016) o tempo de propagação dominante é de um mês. Nota-se que este tempo de propagação difere em algumas regiões (Figura 3). O tempo de

propagação é menor (i.e., um mês) na região de maior altitude entre os estados de SC e do RS (Figura 3), indicando que a seca meteorológica atinge a vazão mais rapidamente nesta área. Por outro lado, o tempo de propagação é maior (i.e., três meses ou mais) na região do noroeste do RS (i.e., no médio rio Uruguai), no alto rio Jacuí (RS), no rio Camaquã (RS), na bacia do rio Iguaçu com exutório próximo ao rio Paraná, e em algumas bacias no estado do Paraná (Figura 3).

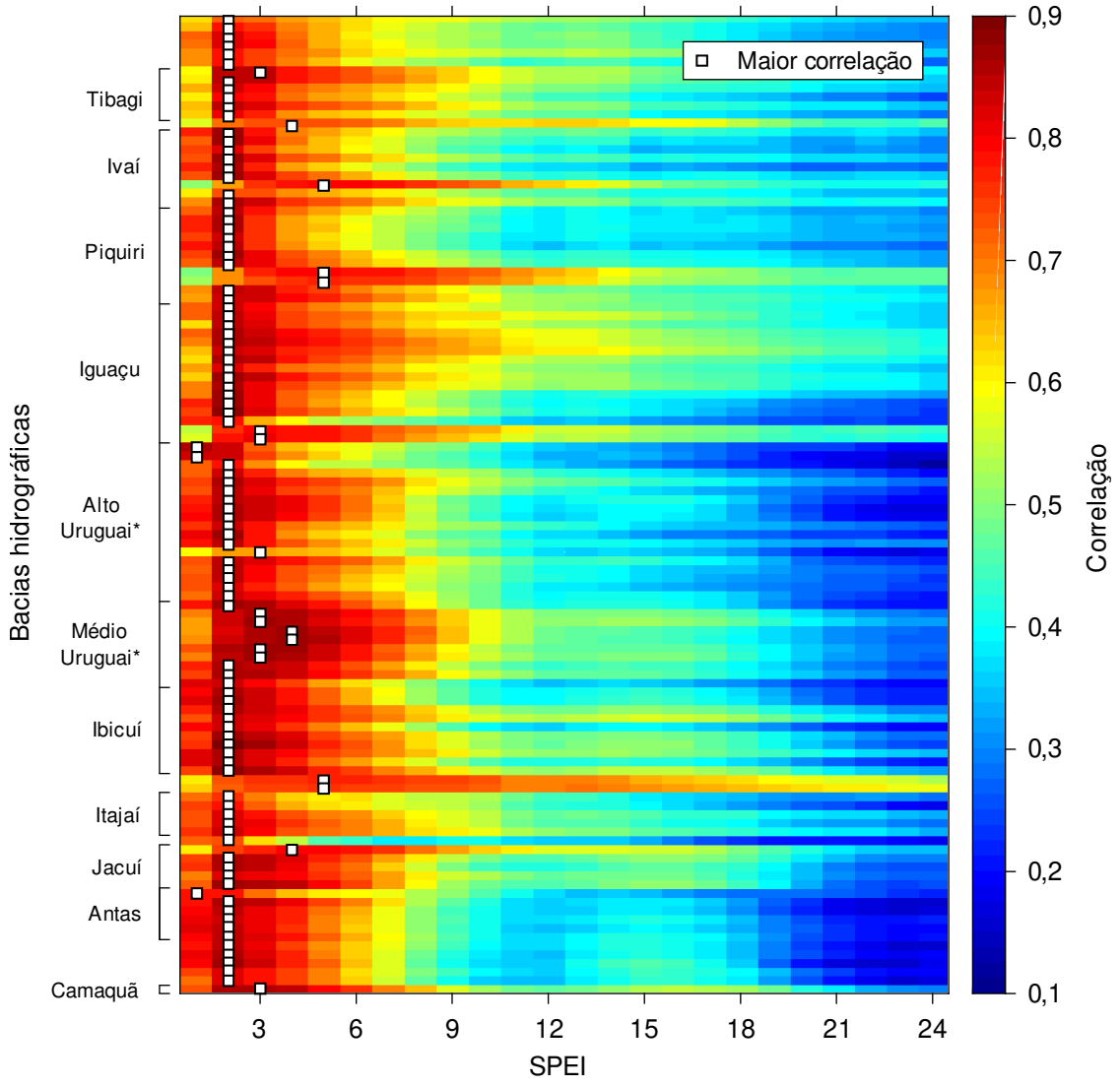

Figura 2 – Mapa de calor com as correlações cruzadas entre o SSI-1 e o SPEI-1 até o SPEI-24 das 112 bacias hidrográficas analisadas. A escala de tempo com a maior correlação é indicada por um quadrado branco e indica o tempo de propagação da seca de cada bacia. * A bacia do Alto Uruguai foi definida com o exutório da estação de código 7410000, no município de Iraí (RS), próximo à divisa entre SC, RS e a Argentina. A bacia do Média Uruguai foi definida como o trecho a jusante.

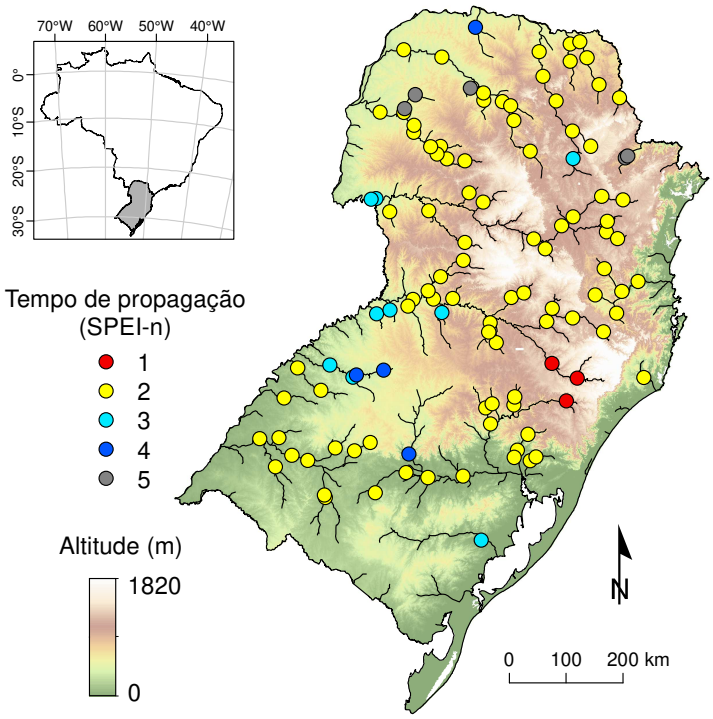

Figura 3 –Tempo de propagação (em meses) da seca meteorológica para a seca hidrológica nas 112 bacias hidrográficas analisadas.

Apesar de algumas bacias terem o tempo de propagação igual a três ou quatro meses, como no noroeste do RS, estas também possuem correlação alta nas escalas de tempo de dois meses (SPEI-2) até cinco meses (SPEI-5). De fato, o RS possui as maiores correlações entre o SSI-1 e o SPEI nas quatro escalas de tempo (Figura 4). Isto indica que, apesar de ter algumas regiões com maior tempo de propagação, as secas hidrológicas no RS são persistentes e seus efeitos podem ser notados desde o primeiro mês de seca meteorológica (Figura 4a). Por outro lado, as bacias localizadas no estado do PR têm menor correlação na escala de tempo de um mês, indicando que as secas hidrológicas são notadas majoritariamente apenas no segundo mês de seca meteorológica.

As correlações altas verificadas indicam uma potencial fonte de previsão de secas hidrológicas a partir de secas meteorológicas. Para verificar este potencial, foi feita a correlação entre o SSI-1 com atraso de um, dois, e três meses com o SPEI-1 até o SPEI-24. A Figura 5 mostra a escala de tempo do SPEI (i.e., o SPEI-n) com a maior correlação com o SSI-1 com atraso, e sua respectiva correlação. Para o atraso de um mês, nota-se que no RS as maiores correlações correspondem ao SPEI da escala de tempo de cerca de 3 a 6 meses (Figura 5a). Estas correlações são maiores que 0,75. Isto indica que, caso se queira prever a série de SSI-1 com um mês de antecedência, o uso do SPEI nas escalas de tempo de 3 a 6 meses pode explicar geralmente mais que 56% (ou $0,75^2$) da variância desta série. O potencial de previsibilidade da série de SSI-1 e de secas hidrológicas a partir do SPEI é reduzida na parte norte do Sul do Brasil e conforme se aumenta o tempo de antecedência da previsão (Figura 5b e 5c).

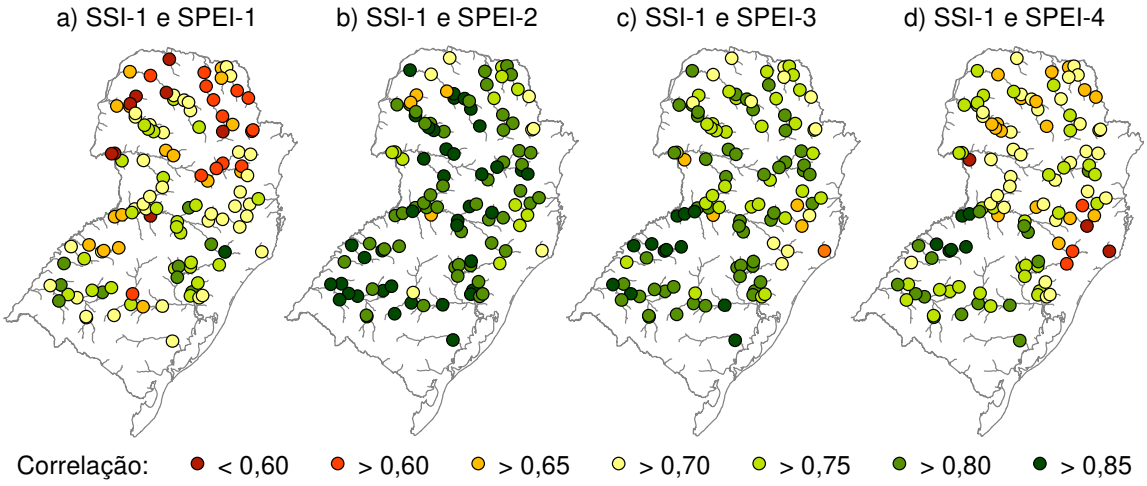

Figura 4 – Correlação entre o SSI-1 e o SPEI-1, 2, 3 e 4 de cada bacia hidrográfica.

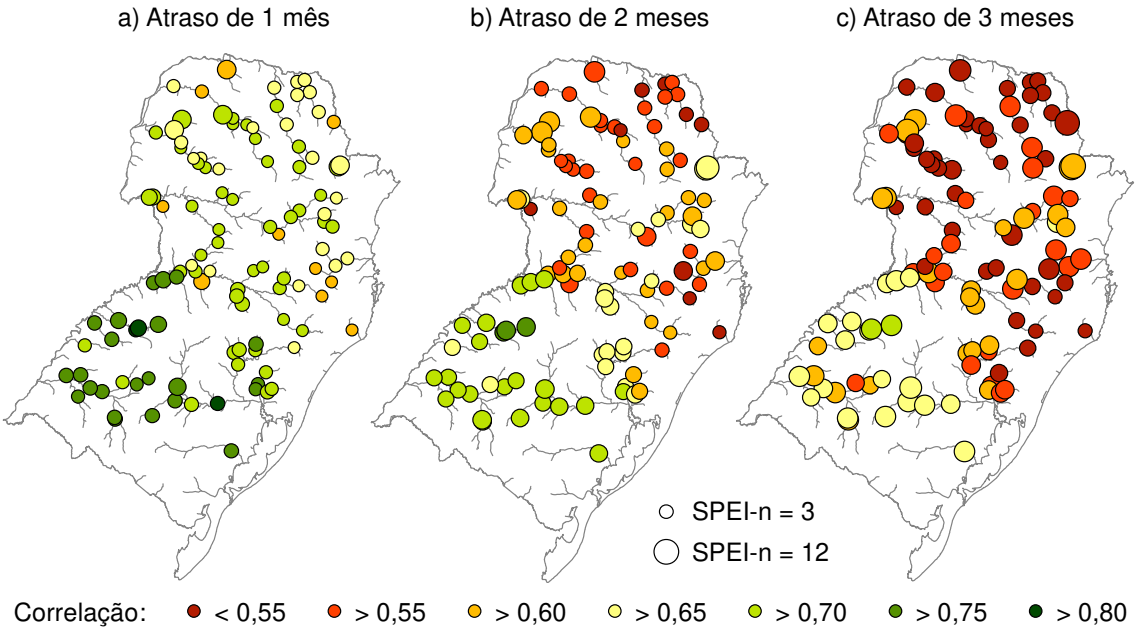

Figura 5 – Maior correlação entre o SSI-1 com 1, 2, e 3 meses de atraso no tempo e o SPEI para cada bacia. O tamanho do círculo representa a escala de tempo do SPEI com a maior correlação, e as cores indicam sua respectiva correlação.

4 - CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou identificar o tempo de propagação para que uma seca meteorológica vire uma seca hidrológica e verificar se as secas meteorológicas podem ser usadas para prever secas hidrológicas no Sul do Brasil. As principais conclusões foram:

(i) O tempo de propagação das secas varia de um a cinco meses, sendo que com dois meses de seca meteorológica já é possível notar os efeitos na vazão em todo o Sul do Brasil;

(ii) O RS possui secas hidrológicas mais persistentes, cujos efeitos já podem ser notados após apenas um mês de seca meteorológica;

(iii) As correlações entre os índices padronizados com atraso no tempo são uma potencial fonte de previsão de secas hidrológicas de baixo custo computacional, principalmente no RS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BARKER, L. J.; HANNAFORD, J.; CHIVERTON, A.; SVENSSON, C. (2016). *From meteorological to hydrological drought using standardized indicators*. p. 2483–2505.

CHATFIELD, C. (2006). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. Chapman & Hall. 333 p.

MELO, D. C.; SCANLON, B. R.; ZHANG, Z.; WENDLAND, E.; YIN, L. (2016). *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.

RODRIGUES, R. R.; WOOLLINGS, T. (2017) *Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer*. Journal of Climate, v. 30, n. 5, p. 1821-1837.

SEN, P. K. (1968). *Estimates of regression coefficient based on Kendall's Tau*. Journal of the American Statistical Association, v. 63, p. 1379-1389.

STAGGE, J. H.; TALLAKSEN, L. M.; GUDMUNDSSON, L.; LOON, F. VAN. (2015). *Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI*). v. 4040, p. 4027–4040.

TEDESCHI, R. G.; GRIMM, A. M.; CAVALCANTI, I. F. A. (2016). *Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter*. International Journal of Climatology, v. 36, n. 15, p. 4797–4814.

THEIL, H. (1950). *A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 1, 2, e 3*. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences, v. 53, 386-392, 521-525, e 1397-1412.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2006). *Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene*. Maryland, EUA. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 out. 2015.

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

VAN LOON, A. F.; GLEESON, T.; CLARK, J.; et al. (2016). *Drought in the Anthropocene*. Nature Geoscience, v. 9, n. 2, p. 89–91.

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

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010). *A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index*. Journal of climate, v. 23, n. 7, p. 1696-1718.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; et al. (2012). *Accurate Computation of a Streamflow Drought Index*. Journal of Hydrologic Engineering, v. 17, n. 2, p. 318–332.

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

WILHITE, D.; GLANTZ, M. H. (1985) *Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions*. Water international, v. 10, n. 3, p. 111-120.

WILHITE, D.; PULWARTY, R. S. (2018). *Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy*. CRC Press, 541 p.