

## **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS**

### **PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO SOBRE A REGIÃO SUDESTE DO BRASIL**

*Lígia M. N. de Araujo*<sup>1</sup>; *Mariana de Araujo Abdalad*<sup>2</sup>; *Isela L Vásquez P*<sup>3</sup>; *Cesar Arturo Sanchez Peña*<sup>4</sup>; *Maria Gertrudes A. Justi da Silva*<sup>5</sup> & *Otto C. Rotunno Filho*<sup>6</sup>

**RESUMO** – Foram calculados índices de precipitação amplamente conhecidos, na busca de evidências que permitam a comparação do comportamento da precipitação sobre diversos locais da região sudeste do Brasil, próximos à Serra do Mar, em especial, de forma a embasar uma avaliação regional das precipitações, com investigação em níveis anual, mensal, diário e até horário. A ideia é que tais avaliações possam contribuir para o aumento da previsibilidade de chuvas intensas e de estiagens prolongadas na região. Os resultados indicam comportamento semelhante das chuvas sobre estações localizadas nas bacias do rio Piabanha (RJ) e do Alto Tietê, região do sistema Cantareira, (MG e SP). Essa semelhança reforça a importância das pesquisas empreendidas na bacia experimental do Piabanha, pois indicam a possibilidade de ali testar metodologias de análise e, então, reproduzi-las em uma bacia de interesse econômico e social tão relevante quanto a do Alto Tietê. Sistemas meteorológicos atuantes sobre as regiões das duas bacias, possivelmente, condicionam a semelhança de comportamento das chuvas, sendo o relevo acidentado o fator de contribuição para a ocorrência de eventos intensos localizados.

**ABSTRACT** – Widely known precipitation indices were calculated, in search for evidences that allow the comparison of precipitation behavior over different sites within the southeast region of Brazil, next to Serra do Mar, in special, in order to support a precipitation regional assessment with investigation under annual, monthly, daily and even hourly levels. The idea is that such assessments may contribute to enhance predictability of intense rainfall as well as of long drought periods. The results indicate similar behavior of precipitation over stations located in Piabanha river basin (RJ) and Alto Tietê river basin, region of Cantareira system (MG and SP). This similarity strengthens the importance of the research works developed in the Piabanha experimental basin, as it indicates the possibility of testing assessment methodologies there and then reproduce them in a basin with so relevant social and economic interest as the Alto Tietê one. Meteorological systems performing over the regions of both watersheds may condition the similarity in precipitation behavior, being the uneven relief the contributing factor to the occurrence of localized intense events.

**Palavras-Chave** – chuvas, variabilidade interanual

---

1) Agência Nacional de Águas (ANA), E-mail: [ligia.araujo@ana.gov.br](mailto:ligia.araujo@ana.gov.br).

\* Autor Correspondente

2) Departamento de Geografia, Instituto de Geociências (IGEO), Universidade Federal do Rio de Janeiro, E-mail: [mariana\\_abdalad@yahoo.com.br](mailto:mariana_abdalad@yahoo.com.br)

3) Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, E-mail: [iselavp@gmail.com](mailto:iselavp@gmail.com)

4) Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, E-mail: [arturo66cta@gmail.com](mailto:arturo66cta@gmail.com)

5) Laboratório de Meteorologia (LAMET), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), E-mail: [justi.meteoro@gmail.com](mailto:justi.meteoro@gmail.com)

6) Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, E-mail: [ottorotunno@gmail.com.br](mailto:ottorotunno@gmail.com.br)

## INTRODUÇÃO

A região sudeste do Brasil apresenta índices pluviométricos altos em consequência da incidência frequente de sistemas frontais e da atividade das Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCOU/ZCAS é uma persistente banda de umidade e precipitação, sendo que a duração superior a 4 dias caracteriza a ZCAS. Sua atuação ocorre de forma episódica, orientada de noroeste a sudeste, da Amazônia em direção ao sudoeste do oceano Atlântico, consistindo um importante agente climatológico do verão na América do Sul (Carvalho *et al.*, 2004). A presença da Serra do Mar condiciona a ocorrência frequente de precipitação, por seu efeito orográfico, seja qual for o sistema meteorológico atuante.

A região serrana do Estado do Rio de Janeiro é palco de desastres cada vez mais severos, principalmente, pela crescente ocupação desordenada. A variabilidade espacial e temporal das precipitações sobre a região tem sido bastante estudada. Se considerada sua inserção na região sudeste, mais referências relevantes são encontradas explicando a ocorrência de eventos extremos (Grimm e Saboia, 2015; Hirata e Grimm, 2016; Zou *et al.*, 2017; Bernardino *et al.*, 2018). Sabe-se que a ocorrência de eventos *El Niño*, fase quente de *El Niño* Oscilação Sul (ENSO), condiciona a ocorrência de ZCAS chamadas oceânicas, que atingem mais diretamente a região costeira dos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo. Esses estudos, em geral, consideram a precipitação em nível anual, segundo o ano civil, e alguns estudos são desenvolvidos em nível mensal. Coelho *et al.* (2016) estudou a região para o período chuvoso (outubro a março).

O desenvolvimento da fase quente de ENSO (EN) tem início na metade de um ano e termina, em geral, na metade do ano seguinte, período que coincide, possivelmente não por acaso, com o ano hidrológico na região. O trimestre mais chuvoso da região coincide com o período mais frequente de atividade da ZCAS, meses de dezembro - janeiro - fevereiro, mas há ocorrências de outubro a março. A ZCAS influencia a climatologia da região sudeste do Brasil e, mediante suas chuvas intensas, com episódios estendendo-se por até 10 dias, podendo causar desastres naturais, como deslizamento de encostas e enchentes. A região é vulnerável por seu relevo acidentado e pela ocupação humana densa e irregular de encostas e planícies de inundação. Episódios de ZCAS têm também resultados positivos, como o de reencher rapidamente os reservatórios de abastecimento e geração hidrelétrica, após períodos prolongados de estiagem e estresse hídrico.

Alguns padrões poderiam ser investigados para os diferentes mecanismos de formação das chuvas, por meio de índices de precipitação, muitos desenvolvidos para estudar secas em regiões áridas. Tais índices podem ser usados também, com eficácia, para identificar períodos de excesso de chuvas, como o *Standardized Precipitation Index* (SPI), proposto em MacKee *et al.* (1993), bem como as estatísticas propostas em Bonacci (1993), ambos tendo trabalhado com séries mensais.

Em particular, Bonnacci (1993) recomenda que as séries tenham, pelo menos, 50 anos de dados, sendo preferível os registros centenários para bons resultados da análise.

Duan *et al.* (2015), por exemplo, em seu estudo de variabilidade das chuvas no Japão, analisa periodicidades e tendências comparando índices críticos definidos pelo ETCCDI (2019), com o comportamento de índices climáticos de temperatura da superfície do mar (TSM) como *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) e *Southern Oscillation Index* (SOI).

## OBJETIVO

O trabalho objetiva avaliar índices de precipitação, já utilizados amplamente em pesquisas, que possibilitem a comparação do comportamento da precipitação em diversos locais da região sudeste próximos à Serra do Mar, em especial, de forma a indicar a viabilidade de um estudo regional das precipitações com investigação mais precisa em níveis diários e até horários de intensidade, e, assim, contribuir para o aumento da previsibilidade de chuvas intensas e de estiagens prolongadas.

## ÁREA DE ESTUDO

São estudadas as chuvas sobre a bacia do rio Piabanha e a bacia do Alto Tietê, mais especificamente, a região dos contribuintes ao sistema Cantareira, principal manancial da cidade de São Paulo. As duas regiões têm características comuns de relevo e regime pluviométrico, além de compartilharem, muitas vezes, os mesmos sistemas meteorológicos responsáveis pela precipitação intensa ou a ausência deles, que desencadeiam períodos de estiagem prolongada.

A Figura 1 ilustra a localização das duas bacias e algumas dessas características, como a configuração das isoietas de totais anuais médios de 1400 mm e a de 700 mm do trimestre DJF, o mais chuvoso nas duas regiões, que envolvem as duas bacias em suas porções mais altas, as cabeceiras do rio Piabanha (RJ) e do rio Piracicaba (MG/SP). As isoietas são encontradas no Atlas Pluviométrico do Brasil CPRM (2011), traçadas para todo o país.

Carvalho *et al.* (2004) sugere que a região de atuação da ZCAS seria a área onde a média diária de radiação de onda longa emitida (ROL) ocorre, com frequência superior a 30%, inferior a  $220 \text{ W.m}^{-2}$  ao longo dos meses DJF. Essa região é praticamente toda envolvida pela isoietas anual de 1400 mm e pela isoietas trimestral de 700 mm de DJF, apresentando pluviosidade acima desses valores. A Figura 2 mostra em destaque essas isoietas (CPRM, 2011) e também as isolinhas de ROL mensais médias de longo período de DJF (NOAA, 2015).

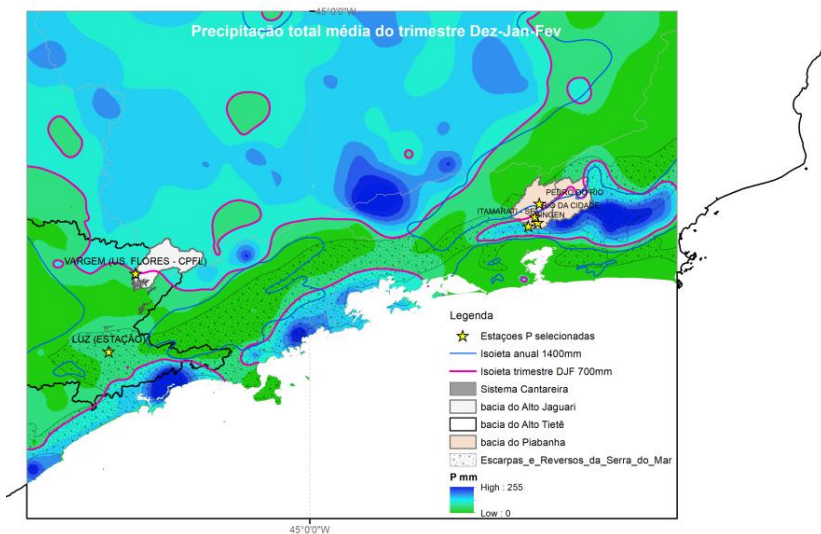


Figura 1 – As bacias do rio Piabanha e do rio Piracicaba e a conformação das isoietas anuais e do trimestre DJF

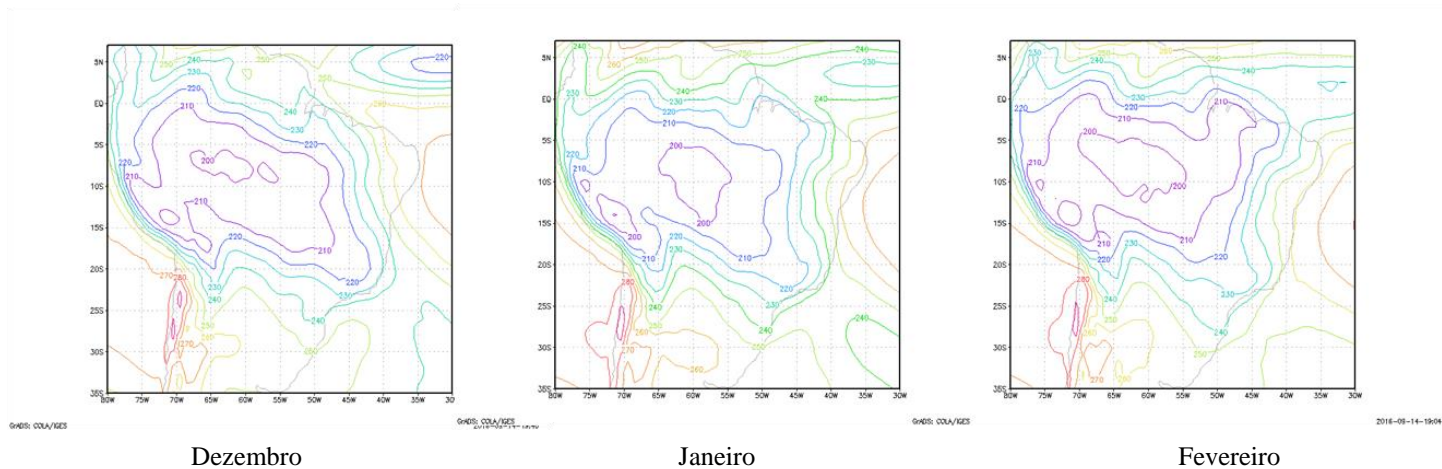
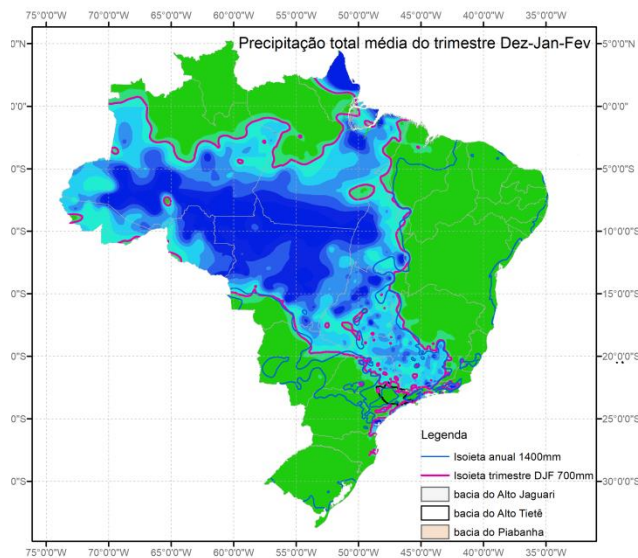


Figura 2 – Isoietas do trimestre DJF com destaque para isoietas trimestral de 700 mm e anual de 1400 mm (alto).  
Contorno de ROL ( $W.m^{-2}$ ) mensal médio de longo termo (inferior)



A ZCAS é uma zona de convergência quase estacionária, permanecendo por até 10 dias, com camada de umidade interior espessa e zonas baroclínicas com um jato subtropical superior e precipitação mensal acima de 400 mm, características que, segundo Kodama (1992), distinguem as Zonas Subtropicais de Precipitação (ZSP), como a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a ZCAS, que têm características distintas de outros sistemas, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e as frentes polares; e, ainda, apresentam precipitações extremas com 7 dias de duração, cujo total excede em 40% a climatologia mensal e apresenta, pelo menos, um dia com precipitação acima de 20% dessa climatologia mensal, conforme Ferraz e Ambrizzi (2006).

Para as duas áreas de estudo, Araujo (2016) e Vásquez *et al.* (2018) encontraram relação entre a variabilidade interanual da precipitação e dos índices de TSM, ENSO e AMO, e PDO, especificamente para a bacia do Alto Tietê.

A influência de ENSO poderia aumentar as precipitações sobre as bacias, tanto em sua fase quente *El Niño* (EN) como em sua fase fria *La Niña* (LN), uma vez que as bacias encontram-se em uma zona limite de influência positiva e negativa de EN/LN sobre as precipitações no Brasil, segundo Coelho *et al.* (2002), destacando essa transição em relação a São Paulo. Foi verificado que a zona limite de influência de ENSO indicada em Coelho *et al.* (2002) é muito próxima da configuração da isoieta total anual de 1300 mm, acima da qual está a parte mais alta da bacia do Piabanha.

Na região de atuação da ZCAS e ao longo da costa sudeste do Brasil, Hirata e Grimm (2016) investigaram a influência de anomalias sinóticas e intrassazonais nas precipitações extremas de verão e encontraram diferentes mecanismos, que se alteram nas fases de ENSO, tendo influência positiva sobre as precipitações extremas. Concluíram que episódios de EN aumentam a frequência de ocorrência de eventos extremos, mas episódios de LN também aumentam as precipitações na região. Ao longo de anos de EN na região, primaveras e verões mais úmidos do que o normal (Grimm, 2003 e 2004, Grimm e Saboia, 2015 e Tedeschi *et al.*, 2015) e, também, invernos e outonos mais úmidos (Tedeschi *et al.*, 2016) costumam ocorrer. Esse fato foi verificado nos dados das estações 2243009-2243268, 2243010, 2243011 e 2243012 da bacia representativa do Piabanha (Araujo, 2016) e na bacia do Alto Tietê (Vásquez *et al.*, 2018).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar o comportamento das precipitações, os dados foram consolidados em nível anual, segundo o ano hidrológico, de setembro de um ano a agosto do ano seguinte, com o ano de início identificando o período. Foram assim calculados os totais anuais de precipitação para cada estação. Os dados foram previamente analisados quanto a sua consistência e as falhas foram

preenchidas por correlação com os dados disponíveis de estações próximas. As correlações apresentaram coeficiente de determinação acima de 0,75, em todos os casos.

As séries de totais anuais foram padronizadas e analisadas em conjunto graficamente. Foram também avaliadas as variações mensais, de duas formas, por meio do índice SPI, de acordo com Mackee (1993), e em comparação com as médias mensais de longo período.

Os totais pluviométricos anuais na região são frequentemente altos. No ano mais seco do histórico, esse total foi superior a 800 mm em todas as estações. O período chuvoso, de outubro a março, concentra mais de 70% do total anual. O índice SPI foi calculado com as séries compreendendo os 12 meses do ano e somente para o período chuvoso, para essa finalidade, considerado com duração de oito meses (setembro a abril).

Essas séries já haviam sido estudadas com outras técnicas em trabalhos anteriores, porém para o período de 1939-2014, para a bacia do rio Piabanha, estações Petrópolis-Bingen 2243009\_268, Itamarati 2243010, Rio da Cidade 2243011 e Pedro do Rio 2243012, em ordem decrescente de altitude e pluviosidade; e de 1888-2014 e 1940-2014 no caso do Alto Tietê, com as estações Luz 2346045 e Vargem 2246032. Para o presente trabalho, as séries foram atualizadas até o ano hidrológico de 2017 ou até dezembro de 2018, no caso da análise de séries mensais.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variabilidade interanual dos totais anuais de precipitação, segundo o ano hidrológico, na bacia do rio Piabanha, é apresentada na Figura 3.

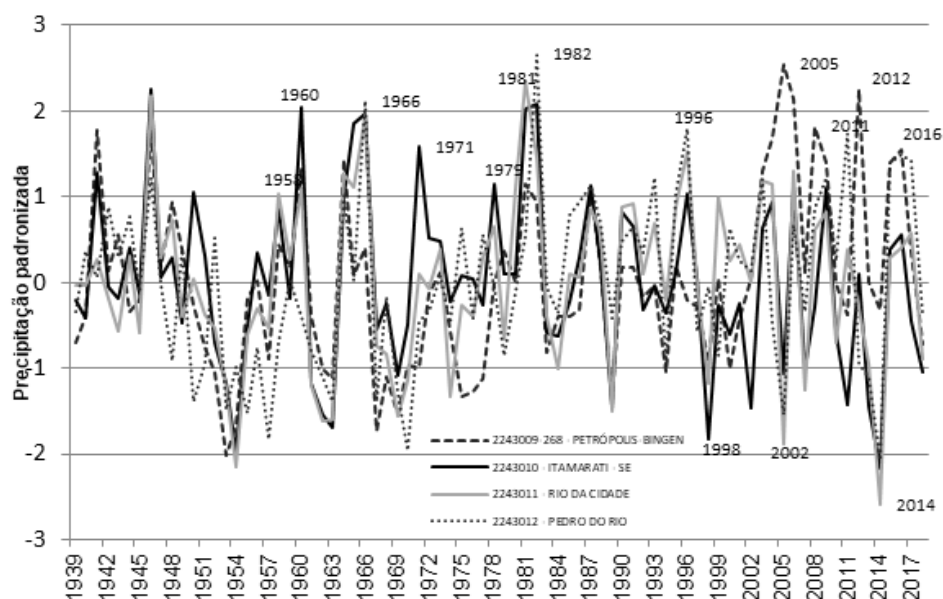


Figura 3 – Variação anual da precipitação padronizada na bacia do rio Piabanha/RJ

A análise revela anos em que há picos de precipitação para as quatro estações, e estes são coincidentes com anos de EN. Os anos 2005 e 2012, na realidade 2005-2006 e 2012-2013, em que

somente os dados da estação 2243009\_268 configuram um pico, correspondem a precipitações ocorridas em consequência de outros mecanismos, como o evento de 2013 bastante localizado na área urbana de Petrópolis, descrito em Araujo *et al.* (2013) e em Andrade *et al.* (2015), este com a análise sinótica do evento com vistas à sua previsibilidade com modelo meteorológico. Andrade *et al.* (2015) descrevem o evento como ocasionado pela presença de frente fria associada a ventos intensos em baixos níveis, que favoreceram a advecção de umidade do oceano para o continente.

O índice SPI foi calculado para 12 meses e defasagem (*lag*) de 1 mês (Figura 4, superior), e para os oito meses mais chuvosos e defasagem (*lag*) de 1 mês (Figura 4, inferior).

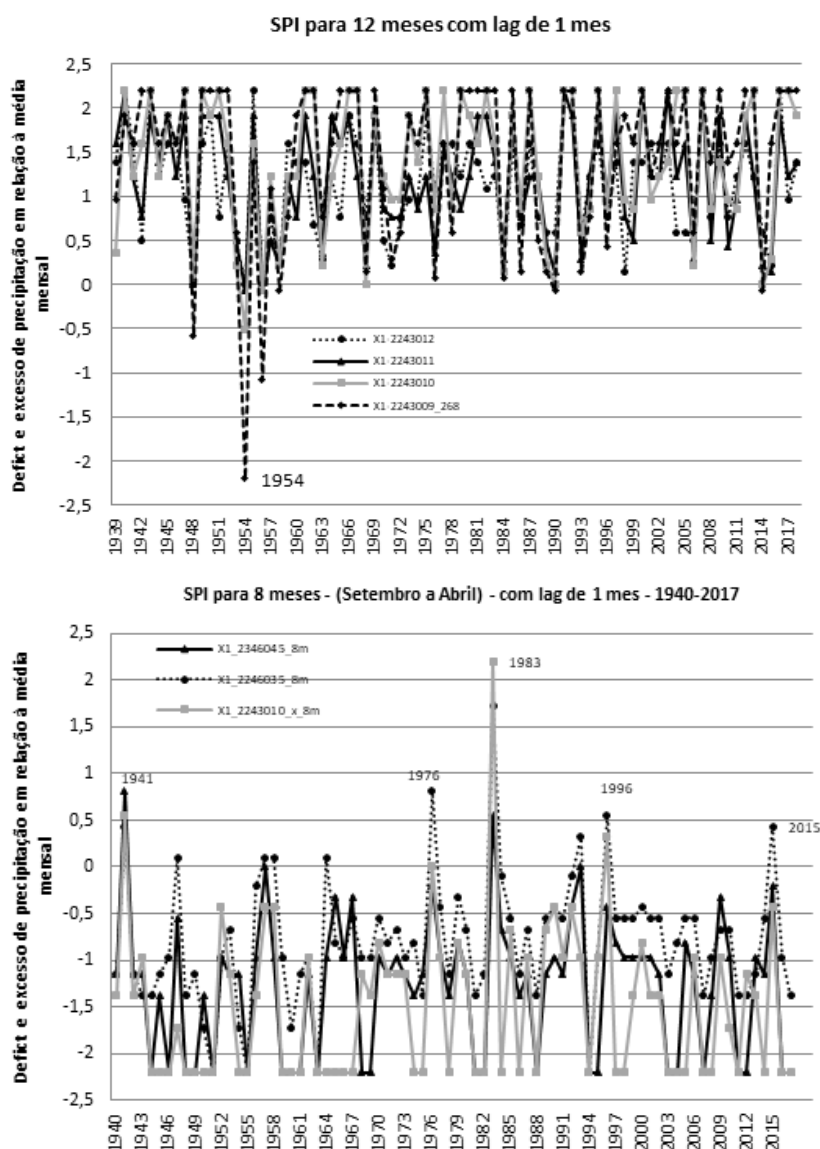


Figura 4 – SPI calculado para 12 meses e os oito meses mais chuvosos ordenados segundo o ano hidrológico

O índice SPI para 12 meses e defasagem (*lag*) de 1 mês destaca apenas anos de estiagem mais severa, 1948, 1954 e 1956 e diz pouco sobre os anos mais úmidos, para as quatro estações da bacia do Piabanha. Em comparação, o SPI para os oito meses mais chuvosos destaca os anos mais úmidos

e a estiagem do período 1954-1956, tanto para a estação Itamarati (Piabanha) como para Luz e Vargem (Alto Tietê). O SPI para 12 meses resulta positivo ao longo de praticamente todo o tempo. Já com a separação do período chuvoso, apenas os anos mais úmidos são revelados com excesso de precipitação, como os anos de EN.

Há semelhança entre as estações das duas bacias quanto aos totais mensais dos meses de estiagem, mais altos em anos de EN, comentado em Tedeschi *et al.* (2016), conforme ilustra a Figura 5 - exemplo dos anos 1982/1983 e 2015/2016 para estações das duas bacias.

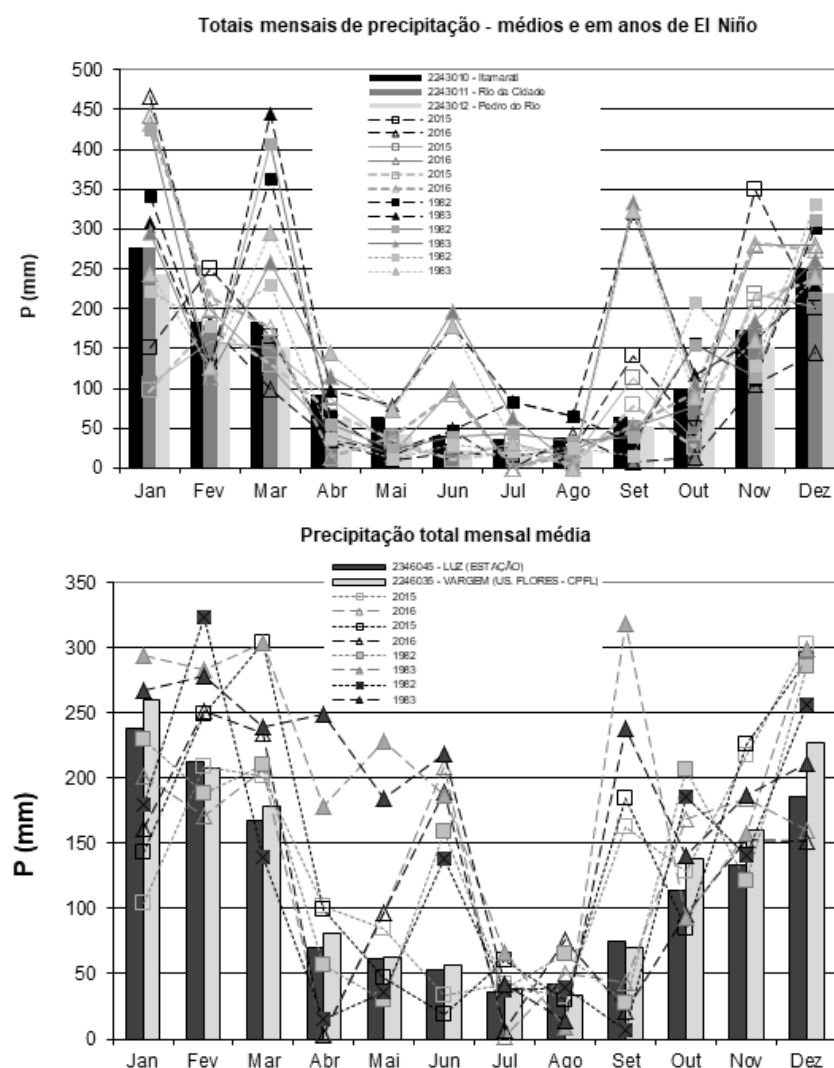


Figura 5 – Totais mensais ao longo de 1982/1983 e 2015/2016 comparados às médias de longo termo

Índices relativos a dados diários de ETCCDI (2019) foram calculados, como o índice de máxima precipitação de 5 dias consecutivos e máxima de 1 dia. Em Itamarati, acumulados de 5 dias acima de 250mm corresponderam a catástrofes no município de Petrópolis, como 327,6 mm (jan-1966); 297,3 mm (fev-1988); 268 mm (jan-2016); e 253,4 mm (nov-1996). Totais máximos diários acima de 100mm ocorreram 22 vezes em anos distintos, e três vezes em 1966. O máximo diário foi 198 mm em 29/11/2015.



## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As duas regiões estudadas, no RJ e em SP, apresentam padrões de precipitação comparáveis, estando sujeitas a sistemas meteorológicos de mesma tipologia, muitas vezes ocorrendo de forma simultânea, ou quase, e respondendo de forma semelhante à atuação do fenômeno EN.

O SPI revela comportamento muito distinto em análises para os 12 meses do ano e para os oito meses mais chuvosos. A variação da defasagem (*lag*) também condiciona resultados diferentes na identificação de déficit e de excesso de precipitação.

Pretende-se calcular outros índices para maior quantidade de estações, como aquelas da rede do CEMADEN, que são automáticas e configuram cobertura densa nas duas bacias em estudo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são dirigidos às agências de fomento CAPES, FAPERJ, CNPq e FINEP, aos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) e Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2020) – E-26/010.002980/2014, FAPERJ nº E-12/2015 e nº E-22/2016 CNPq E-12/2016 e Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e nº 28/2018 – Processo 435714/2018-0 e pelo apoio da CAPES - Código de Financiamento 001. E também às instituições INMET, CPRM, ANA, DAEE-SP e CEMADEN, por sua dedicação ao monitoramento de bacias hidrográficas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, K. M., PINHEIRO, H. R., DOLIF NETO, G. Neto1 *Evento extremo de chuva no Rio de Janeiro: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. Ciência e Natura, Santa Maria*, v. 37 Ed. Especial SIC, 2015, p. 175 – 180. DOI:10.5902/2179460X16236
- ARAUJO L.M.N. de, ABDALAD, M.A., SATO, A.M., ARAUJO, A.A.M., AVELAR, A.S., COELHO NETTO, A.L., ROTUNNO FILHO, O.C. Chuvas Intensas Recorrentes na região da serra do mar/RJ. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX*, Bento Gonçalves, ABRH, 2013. 1CD-Rom.
- ARAUJO, L.M.N. de. *Identificação de padrões hidrológicos de precipitação e de umidade do solo na bacia hidrográfica do rio Piabanha/RJ*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, RJ, 2016.
- BERNARDINO, B. S. VASCONCELLOS, F. C., NUNES, A. M. B. Impact of the equatorial Pacific and South Atlantic SST anomalies on extremes in austral summer precipitation over Grande river basin in Southeast Brazil. *Int. J. Climatol.* 38 (Suppl.1): e131–e143 (2018)
- BONACCI, O. Hydrological Identification of Drought. *Hydrological Processes*, V. 7, 249-262 (1993)
- CARVALHO, L. M. V.; Jones, C. & Liebman, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88–108, 2004.
- COELHO, C. A. S.; UVO, C. B. & AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. *Theor Appl Climatol* 71:185-197, 2002.

- COELHO, C. A. S., CARDOSO, D. H. F., FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *Theor Appl Climatol*, 125:769–784. DOI 10.1007/s00704-015-1540-9, 2016
- CPRM. *Isoietas Médias Anuais e Trimestrais de 1977 a 2006 na escala 1:5.000.000*. In: Atlas Pluviométrico do Brasil. Maceió, 2011. CD e <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso: 2/04/2015.
- ETCCDI, 2019, CCI/CLIVAR/JCOMM *Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)*. Climate Extremes Indices. Disponível em: <<http://www.climdex.org/indices.html>>. Acesso em 9-08-2019.
- FERRAZ, S. E. T. & AMBRIZZI, T. Caracterização da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) em dados de precipitação. In: *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais.... SBMET*, Florianópolis, SC, 2006.
- GRIMM, A. M. The El Niño impact on the summer monsoon in Brazil: regional processes versus remote influences. *Journal of Climate* 16, 263-280, 2003.
- GRIMM, A.M. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Clim Dynam.* 22, 123-138, 2004.
- GRIMM, A. M. & SABOIA J.P.J. Interdecadal Variability of the South American Precipitation in the Monsoon Season. *Journal of Climate* 28, 755-775. doi:10.1175/JCLI-D-14-00046.1, 2015.
- HIRATA, F. E. & GRIMM, A. M. The role of synoptic and intraseasonal anomalies in the life cycle of summer rainfall extremes over South America. *Clim Dyn* 46, 3041–3055. doi:10.1007/s00382-015-2751-6, 2016.
- KODAMA, Y. M. Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan* 70, 813-835, 1992.
- MCKEE, T. B., DOESKEN, N. J., KLEIST, J. The relationship of Drought Frequency and Duration to Time scales. In Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- NOAA, 2015, *Outgoing Longwave Radiation (OLR) - NOAA/ESRL PSD*. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.olrdr.interp.html>>. Acesso em 1/10/ 2015.
- TEDESCHI, R.G.; GRIMM, A.M. & CAVALCANTI, I.F.A. Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *Int J Climatol* 35, 2045–2064. doi: 10.1002/joc.4106, 2015.
- TEDESCHI, R. G.; GRIMM A. M. & CAVALCANTI I.F.A. Influence of Central and East ENSO on precipitation and its extreme events in South America during austral autumn and winter. *Int J Climatol*. doi: 10.1002/joc.4670, 2016.
- VÁSQUEZ P., ARAUJO, L.M.N de, MOLION, L.C.B., ABDALAD, M.A., MOREIRA, D.M., SANCHEZ, A., BARBOSA, H. A., ROTUNNO FILHO, O.C. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. *Clim Dyn*, 50:801–824. doi: 10.1007/s00382-017-3642-9, 2018
- ZOU, Y., MACAU, E. E. N., SAMPAIO, G., RAMOS, A. M. T., KURTH, J. Characterizing the exceptional 2014 drought event in São Paulo by drought period length. *Clim Dyn*.. DOI 10.1007/s00382-017-3932-2, 2017.