



VINÍCIUS OLIVEIRA SILVA

**EVENTOS DE SECA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL:
OCORRÊNCIAS TEMPORAIS E COMPORTAMENTO
FUTURO**

**LAVRAS – MG
2018**

VINICIUS OLIVEIRA SILVA

Eventos de Seca na Região Sudeste do Brasil: Ocorrências Temporais e Comportamento Futuro

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre

Prof. DSc. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS-MG

2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Vinicius Oliveira.

Eventos de Seca na Região Sudeste do Brasil: Ocorrências
Temporais e Comportamento Futuro / Vinicius Oliveira Silva. -
2018.

148 p.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras,
2018.

Bibliografia.

1. Mudanças Climáticas. 2. Episódios de Seca no Sudeste do
Brasil. 3. Índices de Seca. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

VINICIUS OLIVEIRA SILVA

**EVENTOS DE SECA NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL: OCORRÊNCIAS TEMPORAIS E
COMPORTAMENTO FUTURO**

**DROUGHT EVENTS IN THE SOUTHEAST REGION OF BRAZIL: TEMPORAL
OCCURRENCES AND FUTURE BEHAVIOR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre

Dissertação Aprovada em 26 de fevereiro de 2018

Profa. DSc. Chou Sin Chan INPE

Profa. DSc. Silvia de Nazaré Yanagi UFLA

Profa. DSc. Livia Alves Alvarenga

Prof. DSc. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS-MG

2018

À Deus por sempre estender a mão e ser meu conforto e meu amor

À minha mãe Helenice por ter o maior coração do mundo

Ao meu pai Hélio por ser o maior incentivador dos meus sonhos

Ao meu irmão Júnior por ser a pessoa mais inteligente e incrível do mundo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser meu melhor amigo e confidente, por sempre interceder por mim e minha família e por ter me dado a sabedoria para ter realizado esse trabalho.

À minha família, meu pilar e minha estrutura, por terem sido pacientes com o meu mau-humor e pela minha falta de tempo.

Aos órgãos de fomento ao programa de pós graduação em recursos hídricos em sistemas agrícolas por serem incentivadores da pesquisa.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Rogério de Mello, por ser exemplo de professor e cientista, por ter me dado a oportunidade de ser seu orientado e por ser peça fundamental na minha formação como engenheiro e por me motivar a ser um ótimo professor.

Ao INPE e a Dra. Chou Sin Chan pelos dados cedidos e pela oportunidade de ter desenvolvido essa pesquisa.

As professoras Dr. Livia Alvarenga e Dra. Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi Coelho por serem referência em hidrologia e climatologia, áreas que aprendi a admirar e a adorar. Espero que um dia seja um professor tão bom quanto vocês.

À UFLA e a todos os membro do Núcleo de Engenharia de Água e Solo, por terem me dados as oportunidades de crescer como profissional e como pessoa. Vocês me motivam a querer ser um professor no futuro.

Aos meus colegas e amigos do dia a dia, Tiguto, Renato, André, Marcela, Vinicius, Vanessa e João Pedro por tantas horas na matinha, independente do dia.

Aos amigos do “Team Wod” e da Kve6 por terem sido presentes da minha vida e por serem parte da minha alegria diária. Com vocês foi mais fácil superar os tempos de ansiedade, pressão e nervosismo.

As pessoas queridas do meu coração: Mônica, Gabi, Carol, Lerranya, Pedro, Moacir, Luiz, Conrado, Baiano, e tantos outros que moram no meu coração

“Por onde estiver o vosso tesouro, aí estará seu coração”

J.K. Rowling

RESUMO

Seca são fenômenos climáticos que afetam de forma proeminente uma região. Seus efeitos podem ser observados na agricultura, na pecuária, no abastecimento de água e no turismo. O objetivo deste estudo foi analisar, com base nos índices SPI (“*Standard Precipitation Index*”) e SPEI (“*Standard Precipitation Evapotranspiration Index*”), o comportamento e a frequência de secas no centro-sul do Sudeste do Brasil, caracterizado por três regiões metropolitanas (São Paulo, Campinas e Belo Horizonte), a região sul de Minas Gerais (Lavras) e a região centro-leste de São Paulo (Piracicaba) e sua ocorrência futura com base em projeções dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, RCP 4.5 e RCP8.5, até o fim do século XXI. Os resultados evidenciaram que o período entre 2013-2015 foi o mais seco já observado para a região centro-sul do Sudeste do Brasil, com anos consecutivos precipitação abaixo da média histórica acompanhados de altas temperaturas médias. Recomenda-se a utilização do SPEI para a cidade de São Paulo, uma vez que a cidade mostra-se mais sensível aos efeitos da temperatura do que as demais cidades estudadas. Para as cidades de Lavras, Nova Lima, Campinas e Piracicaba observou-se que os resultados do SPI e SPEI são semelhantes e ambos os índices são recomendados para a identificação e eventos de seca. O modelo Eta-HadGEM2-ES tende a projetar eventos de seca, baseados no SPI, em blocos, com inúmeros eventos ocorrendo de forma consecutiva, enquanto o modelo Eta-MIROC5, tende a projetar situações mais próximas das observadas, com valores alternando entre SPI positivo e negativo. O SPEI apresentou valores similares ao SPI com o modelo Eta-MIROC5, uma vez que o modelo simula o crescimento da precipitação e o saldo do balanço hídrico vertical ($P - ETp$) não é afetado pelo crescimento da temperatura como no modelo HadGEM2-ES. O cenário RCP 8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES projeta as piores condições de seca no fim do século XXI para as regiões estratégicas do sudeste, caso as emissões de gases do efeito estufa continuem. Assim, ficou evidenciado que a região Sudeste apresenta vulnerabilidade climática importante a episódios de seca e que a compreensão da ocorrência desses fenômenos no futuro consiste de uma ferramenta importante para subsidiar gestores públicos e privados na região sudeste.

Palavras-chave- Índices de Seca, simulações climáticas, episódios de seca, recursos hídricos

ABSTRACT

Droughts are climatic phenomena that may strongly affect a given region. Its effects may be observed in different areas such as agriculture, livestock, water supply, and tourism. This study aimed to analyze, based on the Standard Precipitation Index (SPI) and the Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), the drought events that had affected three of the greatest Metropolitan Brazilian regions (São Paulo, Campinas, and Belo Horizonte), south of Minas Gerais State region (Lavras) and the central-east region of São Paulo State (Piracicaba) in the past. In addition, the study aimed to analyze the future occurrence of drought events based in two different Global Climate Models, Eta-MIROC5 and Eta-HadGEM2-ES, and two different scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) until 2099. The results have shown that the most severe drought episodes in the studied region occurred throughout the hydrological years of 2013-2014 and 2014-2015. The comparison of the two studied indexes have shown that the SPEI is more sensitive to drought events, since it takes into account the temperature for its calculation. It is recommended to use the SPEI index for the city of São Paulo, since the region is more sensitive to the effects of temperature than the other cities studied. For the cities of Lavras, Nova Lima, Campinas and Piracicaba, it was observed that the results of SPI and SPEI are similar and both indices may be used to identify drought episodes. The drought episodes simulated by the Eta-HadGEM2-ES model are concentrated in blocks, with several events occurring consecutively, while the Eta-MIROC5 has shown a intercalation between positive and negative SPI. The SPEI index simulations were similar to the SPI for the Eta-MIROC5, however this behavior was not noticed for the Eta-HadGEM2-ES, wherein the temperature is a important factor. The Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5 simulated the worst drought scenario, where the temperature climbs until the end of the 21st century. Thus, it was evidenced that the southeastern Brazil presents a highlighted climate vulnerability to severe drought episodes and the understanding of the nature of these phenomena through climate models can be significant to subsidize the public and private companies to implement actions aiming to reduce the harm effects of extreme/severe droughts in the future.

Key-words- Drought index, drought episodes, climate models, water resources

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1. Introdução	12
2. Referencial Teórico	15
2.1. Secas	15
2.2. Histórico de Secas no Brasil	16
2.3. Índices de Seca	18
2.3.1. Standard Precipitation Index (SPI)	20
2.3.2. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	22
2.4. Mudanças Climáticas e Seus Impactos	23
2.5. Modelos Climáticos de Previsão	24
2.5.1. MIROC5	25
2.5.2. HadGEM2-ES	26
2.5.3. Modelo Eta	27
2.6. Cenários do IPCC	27
3. Referências	29
SEGUNDA PARTE- CAPÍTULOS	37
CAPÍTULO 1	38
Frequência de Eventos de Seca na Região Sudeste do Brasil	38
1. Introdução	39
2. Material e Métodos	41
2.1. Base de Dados	41
2.2. Análise Exploratória dos Dados	45
2.3. Standard Precipitation Index (SPI)	46
2.4. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	46
3. Resultados e discussão	48
3.1. Comportamento da precipitação	48
3.2. Comportamento da evapotranspiração	53
3.3. Comportamento do Standard Precipitation Index (SPI)	57
3.4. Comportamento do Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	65
4. Conclusões	73
5. Referências	74
CAPÍTULO 2	82

Impactos de Mudanças Climáticas sobre Eventos de Seca em Regiões Estratégicas.....	82
1. Introdução.....	83
2. Material e Métodos.....	86
2.1. Base de Dados	86
2.2. Standard Precipitation Index (SPI).....	88
2.3. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI).....	89
3. Resultados e Discussão.....	90
3.1. Projeção futura da precipitação nas regiões estudadas do sudeste do Brasil.....	90
3.2. Projeção futura da evapotranspiração potencial nas regiões estudadas do sudeste do Brasil.....	94
3.3. Projeção do comportamento do SPI nas regiões estudadas no sudeste do Brasil ao longo do século XXI.....	97
3.3.1. Análise do comportamento dos modelos climáticos para projeção do SPI no tempo presente	97
3.3.2. Análise das projeções segundo o modelo Eta-HadGEM2-ES	106
3.3.3. Análise das projeções segundo o modelo Eta-MIROC5	112
3.4. Projeção do comportamento do SPEI nas regiões estudadas no sudeste do Brasil ao longo do século XXI.....	118
3.4.1. Análise do comportamento dos modelos climáticos para projeção do SPEI no tempo presente	118
3.4.2. Análise das projeções segundo o modelo Eta-HadGEM2-ES	127
3.4.3. Análise das projeções segundo o modelo Eta-MIROC5	134
4. Conclusão	140
5. Referências Bibliográficas	141

PRIMEIRA PARTE

1. Introdução

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela abundância de seus recursos hídricos. A maior parte de suas reservas superficiais de água doce, porém, está concentrada na região Norte do país, distante das regiões mais populosas e com atividades econômicas mais intensas, encontrando-se, portanto, limitada para milhões de brasileiros. Nesse cenário, diversas regiões metropolitanas das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, tem enfrentado problemas em suprir a demanda de água para seus habitantes e para atender as demandas dos setores econômicos.

Os estados de São Paulo e Minas Gerais possuem, juntos, mais de 30% da população brasileira, são responsáveis por 40% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e possuem cerca de um quarto de toda a capacidade de geração de energia hidroelétrica instalada no país (ANEEL, 2017; IBGE, 2016). Nessa tocante, a disponibilidade hídrica da região interfere diretamente na economia e no abastecimento de água de toda essa população.

As secas são fenômenos naturais que podem ser compreendidos como o déficit de precipitação sobre uma região em um período extenso de tempo, tendo como consequências a redução da água aos animais, à população e à vegetação. Elas podem impactar negativamente a economia de um país, afetando o consumo de água, a produção agrícola e a produção de energia. No Brasil, diversos eventos afligiram o país nas últimas décadas, sendo que merecem destaque, as secas na Amazônia em 2005 e 2010, e a crise hídrica de 2001 que levou ao racionamento de energia elétrica.

A ausência de extensas bases de dados meteorológicos e hidrológicos, a qualidade e o compartilhamento de dados entre empresas privadas, públicas e instituições de pesquisa representam os maiores obstáculos para o monitoramento e o registro dessas ocorrências meteorológicas. Dessa maneira, o desenvolvimento de índice que retratem os eventos de seca de forma simples e eficaz se fez necessária.

No âmbito científico, índices são ferramentas que agregam diversas informações científicas e simplificam a informação através de um único valor, fácil de ser entendido. Dessa maneira, índices que utilizam somente valores de precipitação, como o Standard Precipitation Index (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) e o China-Z Index (CZI) (YANG; LIJUAN; YOUJIN, 1997), e índices que utilizam o balanço hídrico vertical como Standard

Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2009) e o Índice de Palmer (PALMER, 1965), surgiram como ferramentas importantes para a identificação de secas e seus graus de amplitude.

O entendimento da ocorrência temporal dos eventos de seca pode ajudar órgãos públicos e agências de pesquisa a traçarem estratégias para uma gestão futura adequada dos recursos hídricos. Avaliar a frequência, sua possível relação com outros fenômenos meteorológicos, como o El Niño e La Niña, e a sua magnitude, podem ajudar no aprofundamento do conhecimento sobre esses eventos.

Entre 2013 e 2015, a região Sudeste do Brasil passou por um período de estiagem muito intenso, em que foram registrados volumes de chuva muito abaixo das médias históricas para a estação chuvosa (Outubro a Março). O ano hidrológico de 2013-2014 apresentou uma das piores secas já registradas sobre a Serra da Cantareira, principal reservatório responsável pelo abastecimento de água da cidade de São Paulo, o que contribuiu para que alcançasse o volume mais baixo já registrado entre 1960 e 2015 (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016; MARENGO et al., 2015).

No mesmo período, o Rio Piracicaba atingiu a menor vazão em 30 anos, atingindo uma profundidade média de 79 cm, segundos dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE, 2018). Ainda no estado de São Paulo, a Região Metropolitana de Campinas sofreu com diversos dias de racionamento e com o aumento dos níveis de poluentes nos cursos d'água, em que foram necessárias a adição de 500% a mais de cloro no tratamento da água proveniente do rio Atibaia, onde o volume era 30% menor do que o recomendado para o atendimento de toda população (SANASA, 2014).

Em Minas Gerais, dados da COPASA (2018) apontaram que o reservatório de Serra Azul, uma dos principais fontes para o abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte, alcançou 5,8% de sua capacidade total. No sul de Minas Gerais, o reservatório de Furnas atingiu menos de 20% da sua capacidade, comprometendo a geração de energia hidrelétrica do país.

O estudo do comportamento de eventos climáticos extremos, como as secas, sob condições de alteração da dinâmica climática global tem sido desenvolvido a partir de modelos de simulação do clima global (GCMs). Segundo Chou et al. (2014a), esses modelos são um dos principais mecanismos para gerar informações sobre possíveis cenários futuros baseados em simulações de emissões de gases do efeito estufa na atmosfera do planeta. Os cenários futuros

podem ser usados no desenvolvimento de políticas estratégicas para amenizar, mitigar e planejar ações futuras contra os impactos de eventos extremos.

Os GCMs são modelos matemáticos que tentam representar da maneira mais adequada possível fenômenos físicos e químicos presentes na atmosfera e suas interações com outros sistemas, como a litosfera, a criosfera e a biosfera. Os modelos climáticos ainda podem variar na sua complexidade, tendo menos ou mais componentes em suas simulações, assim como a escala, podendo abranger uma área menor ou maior. Os modelos podem considerar ainda, mudanças no uso do solo e da terra, e a variação das emissões de gases do efeito estufa com o passar dos anos, simulando assim, diferentes cenários e eventos.

Os modelos climáticos podem apresentar resultados diferentes. Collins et al. (2013) apontam que no final do século XXI, eventos mais extremos de chuva podem se tornar bem mais comuns, entretanto o período de tempo entre uma chuva e outra pode se tornar cada vez mais longo. Wehner et al. (2011) analisaram diversos modelos para prever o comportamento das secas nos Estados Unidos e no México no século XXI e encontraram que a maioria dos modelos preveem um aumento na quantidade e na severidade de eventos de seca.

Dentre os modelos estudados pelo CPTEC/INPE, destacam-se o Eta-MIROC5 e o Eta-HadGEM2-ES. MIROC ou Modelo Interdisciplinar para Pesquisas do Clima é um modelo desenvolvido em conjunto pelo Centro para Pesquisas de Sistemas Climáticos do Japão (CCSR), Universidade de Tóquio e o Instituto Japonês para Pesquisas do Meio Ambiente (NIES) e Agência Japonesa para Ciência e Tecnologia Marinha e Terrestre. O HadGEM2-ES é um modelo desenvolvido pelo Hadley Centre, em Londres, cujo objetivo é simular e entender o clima futuro a partir de respostas de equações que descrevam processos químicos, biológicos e físicos dentro da atmosfera, oceano, criosfera e biosferas marinha e terrestre (COLLINS et al., 2011).

O presente estudo foi realizado em 5 cidades da região sudeste do Brasil, correspondendo a três das principais regiões metropolitanas do país (São Paulo e Belo Horizonte e Campinas), a região Sul de Minas Gerais, notadamente importante pelo potencial de geração hidrelétrica (Lavras) e a região de Piracicaba, SP, cujo potencial agrícola, especialmente o da cana-de-açúcar, é estratégico para o país.

Assim, os objetivos gerais desse trabalho são: 1) analisar o comportamento temporal e a frequência de eventos de seca em cinco regiões estratégicas do centro-sul do Sudeste do Brasil pela utilização de dois índices de seca, o Standard Precipitation Index e o Standard Precipitation

Evapotranspiration Index (SPEI); 2) analisar o impacto de mudanças climáticas sobre o comportamento temporal e a frequência de eventos de seca até o final do século XXI projetados por dois modelos climáticos e dois cenários de emissão de gases do efeito estufa, em regiões estratégicas do Sudeste do Brasil pelos índices SPI e SPEI.

2. Referencial Teórico

2.1. Secas

O ciclo hidrológico é constituído de uma variável de entrada, a precipitação, e diversas variáveis de saída como a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento. Quando considera-se o conceito de seca, vários termos são encontradas na literatura. A Organização Meteorológica Mundial (WMO; GWP, 2016), define seca como um fenômeno natural e comum, que erroneamente é considerado como raro e como um evento randômico.

Chanda e Maity (2015) definem seca como a ausência de precipitação ou como um volume insuficiente de precipitação sobre uma região em um determinado período. Caloiero et al. (2016) a descrevem como um desequilíbrio natural temporário na disponibilidade de água em níveis abaixo da média histórica, que podem causar impactos na agricultura, no abastecimento de água e na economia. A seca difere da aridez, que é restrita a regiões em que historicamente chove-se pouco e é uma característica permanente do clima, como as regiões desérticas (WMO; GWP, 2016).

As secas devem ser analisadas além da ausência de precipitação. Além de impactar a vegetação e a economia, as secas tem um impacto social (BLAIN; KAYANO, 2011a; MARENGO et al., 2015). Alston e Kent (2004) apontam que as secas estão diretamente relacionadas com o êxodo rural e o aumento de problemas de saúde nas comunidades rurais. Entretanto, uma gestão eficiente dos recursos hídricos e a preparação dos órgãos públicos para enfrentar um evento de seca pode minimizar o seu impacto na sociedade (WILHITE, 2000).

Os efeitos da seca podem ser observados em diversas ecossistemas. Anderegg (2015), Elkin et al. (2015) e Gouveia et al. (2017) apontam que as secas tem impacto direto na atividade biológica e hidrológica das florestas, tendo impacto direto em sua fisiologia. Schlesinger et al. (2016) apontam que as secas tem relação com a diminuição do tamanho da copa das árvores e, esse impacto, estende-se por todo o ecossistema, afetando a produção de matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, a comunidade microbiana do solo.

Por alterar o meio ambiente, os impactos também podem ser vistos na saúde da população. Mosley (2015) aponta que as mudanças climáticas podem alterar o regime de secas, podendo levar à alteração da qualidade da água de diversos cursos d'água, resultando no aumento da concentração de substâncias poluentes e tóxicas. Smith et al. (2014) analisaram os efeitos da seca na região Amazônica em 2005 em diversas cidades e verificaram um aumento de 1,2 a 26,7% de hospitalizações de crianças devido a doenças respiratórias no período.

Eventos de seca geralmente estão associados a escassez hídrica e altas temperaturas. Otkin et al. (2016) analisaram os efeitos da seca na região central dos Estados Unidos em 2012 e verificaram uma alteração da umidade do solo nos primeiros 10 cm do solo, camada em que a maioria das culturas utiliza para retirada de água. Os autores observaram, ainda, uma perda rápida de água próxima ao solo devido à temperaturas altas e a ausência de chuva. Outros fenômenos como a desertificação e a diminuição da fertilidade do solo também podem estar diretamente relacionados a falta de chuva e altas temperaturas sobre uma região. (HIRSCHI et al., 2014; KRISHNAN et al., 2006; OTTO et al., 2014).

Analisar o comportamento de episódios de seca podem ajudar especialistas e gestores na prevenção e mitigação de possíveis problemas para a sociedade. Mckee, Doesken e Kleist (1993) apontam que o monitoramento de seca deve incluir cinco problemas práticos, o tempo de duração da seca, a probabilidade de sua ocorrência, o déficit de precipitação, seu impacto no balanço hídrico e os impactos da seca na sociedade.

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) monitora a severidade das secas pela utilização do índice SPI, juntamente com a ocorrência de queimadas, de forma que as duas informações juntas possam ser ferramenta de precaução e de alerta a autoridades (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2017).

2.2. Histórico de Secas no Brasil

O Brasil é um país de dimensões continentais e, portanto, seu clima é influenciado por diversos fenômenos meteorológicos. Em um mesmo ano, podem ser vistos enchentes na região Amazônica e eventos de seca na região sul do país Marengo et al., (2013) observaram que em 2012 a região Amazônica foi afetada por grandes enchentes, enquanto a região Nordeste foi afetada por uma grande seca, ambas consideradas as maiores em 50 anos.

Os primeiros estudos sobre eventos de seca no Brasil estão relacionados a região Nordeste do Brasil. Estudos da década de 1970 já tentavam verificar a relação dos episódios de

seca com fenômenos meteorológicos. Namias (1972) e Hastenrath e Heller (1977) já observavam uma ligação entre a temperatura do nível do oceano (SST) ao longo da costa do Equador/Peru com o regime de chuvas sobre a região. Markham e Mclain (1977) estudaram a influência dos fenômenos de El Niño na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e verificaram que ela tende a ter maior influência em zonas em que a SST é maior. Logo, ela desvia-se da região Nordeste, deslocando-se para cima e levando a umidade para longe.

Rao, Hada e Hierdies (1995) estudaram os eventos de chuva da região Nordeste de 1912 a 1993. Os pesquisadores verificaram que a seca de 1993 foi severa e comparável as maiores já registradas até o período (1915, 1919, 1932 e 1958), além de estar diretamente relacionada com a presença de El Niño. Marengo et al. (2013) verificaram que em 2012 a seca sobre a região Nordeste foi causada pelo aquecimento das águas do Oceano Atlântico Superior, o que levou ao deslocamento da ZCIT ao norte e, conseqüente deslocamento da umidade.

A partir da década de 1990, houve uma crescente preocupação com os episódios de seca que afetavam a região Amazônica. Williamson et al. (2000) observaram os impactos da seca de 1997 na mortalidade de árvores da floresta Amazônica e verificaram que esse evento está relacionado diretamente ao El Niño-Southern Oscillation (ENSO).

Zeng et al. (2008) verificaram os impactos da seca de 2005 sobre a região Amazônica e observaram que apesar do evento não ter apresentado valores muito abaixo das médias históricas, o acúmulo de anos secos (2002-2005) resultou na redução de 16% do volume de água na foz do rio Amazonas e um aumento de 100% no caso de queimadas.

Marengo et al. (2011) observaram a seca de 2010 sobre a Amazônia e verificaram que essa seca foi mais severa do que a de 2005. Os autores afirmam que ela ocorreu devido ao aquecimento das águas do Atlântico Norte e o deslocamento da ZCIT para cima foi ainda maior, o que a caracterizou como a pior seca no período de 1903-2010. Lewis et al. (2011) ainda verificaram um contínuo aumento da mortalidade de árvores e aumento do número de incêndios no período.

O número de trabalhos que avaliam as causas e impactos de secas nas regiões de Sul e Sudeste na literatura ainda destoam dos encontrados para a região Sudeste e Amazônica. Grimm, Ferraz e Gomes (1998) analisaram os episódios de seca na região Sul verificaram que episódios de seca podem estar relacionados diretamente a eventos de La Niña.

Vicente -Serrano, Begueria e López-Moreno (2009) aplicaram a metodologia SPEI para analisar os eventos de seca em São Paulo de 1910 e 2010 e verificaram eventos de seca muito proeminentes no começo do século XX, na década de 1960 e no começo do século XXI. Blain e Kayano (2011a) analisaram valores de precipitação de 1890 a 2011 para a cidade de Campinas e verificaram que os ENSOs não tem influência direta nos episódios de seca.

2.3. Índices de Seca

Índices de Seca são definidos como representações numéricas da severidade da seca, que utilizam dados climáticos ou hidrometeorológicos (WMO; GWP, 2016). Índices geralmente são criados para ser simples, estatisticamente poderosos e serem fáceis de se entender (WMO (2012)). Eles são capazes de sintetizar diversas informações em único valor, que geralmente são separados em classes.

A escala de tempo utilizada na construção de índices de seca é um fato importante a ser analisado. Diferentes ecossistemas podem responder de maneiras diferentes ao déficit de precipitação (PANDEY; S. RAMASASTRI, 2001). Por essa razão é importante associar esses índices a escala temporal, para que possam ser úteis para o monitoramento e gestão dos recursos de água (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2009). A Organização Meteorológica Mundial separa alguns índices conforme sua dificuldade de cálculos e os parâmetros utilizados nos cálculos. O quadro 1 demonstra os índices calculados com dados de entrada meteorológicos.

Dados Meteorológicos	Dificuldade	Parâmetros de Input	Informação Adicional
Aridity Anomaly Index (AAI)	Verde	P, T, PET, ET	Disponível como ferramenta de monitoramento na Índia
Deciles	Verde	P	Fácil de Calcular; utilizado na Austrália
Keetch–Byram Drought Index (KBDI)	Verde	P,T	Os cálculos são baseados no clima da área de interesse
Percetual Normal de Precipitação	Verde	P	Cálculos Simples
Standardized Precipitation Index (SPI)	Verde	P	Destacado pela WMO como ponto de partida para estudos de seca
Weighted Anomaly Standardized Precipitation (WASP)	Verde	P,T	Monitoramento de regiões tropicais
Aridity Index (AI)	Amarela	P,T	Pode ser usado para classificações climáticas
China Z Index (CZI)	Amarela	P	Criado com a intenção de melhorar os resultados do SPI
Crop Moisture Index (CMI)	Amarela	P,T	São necessários valores mensais
Effective Drought Index (EDI)	Amarela	P	Software necessário
Hydro-thermal Coefficient of Selyaninov (HTC)	Amarela	P,T	Fácil de Calcular; utilizado na Austrália
NOAA Drought Index (NDI)	Amarela	P	Usado para fins agrícolas
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Amarela	P, T, AWC	Cálculo complexo
Palmer Z Index	Amarela	P, T, AWC	Um dos inputs do PDSI
Rainfall Anomaly Index (RAI)	Amarela	P	Série completa de dados é requerida
Standardized Anomaly Index (SAI)	Amarela	P	Usado para descrever condições regionais

Quadro 1- Índices de Seca do Handbook da OMS (continua)

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)	Amarela	P,T	Índice similar ao SPI, mas como a temperatura como componente
Agricultural Reference Index for Drought (ARID)	Vermelha	P, T, Mod	Produzido pelo governo americano e não testado em outras regiões
Crop-specific Drought Index (CSDI)	Vermelha	P, T, Td, W, Rad, AWC, Mod, CD	Muitas variáveis são necessárias

P= precipitação, T= Temperatura, PET= Evapotranspiração Potencial, AWC= Disponibilidade de Água, ET= Evapotranspiration Mod= Modelado, W= velocidade do Vento, Rad= Radiação Solar, CD= Dados de Cultura, Td= Temperatura do Ponto de Orvalho

Fonte: WMO e GWP (2016)

2.3.1. Standard Precipitation Index (SPI)

O *Standard Precipitation Index* (SPI) foi o resultado de uma pesquisa realizada na Universidade Estadual do Colorado em 1992 (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993). O objetivo do trabalho realizado pelos cientistas era descobrir a relação dos episódios de seca com a frequência com que ocorriam, sua duração e o intervalo de tempo entre esses eventos (WMO; GWP, 2016).

Devido a sua simplicidade e a sua ampla utilização nos estudos de episódios de seca (HAYES, 2002), o SPI foi escolhido, em 2009, pela Organização Meteorológica Mundial como a principal ferramenta no monitoramento desses eventos (WMO; GWP, 2016). Entre suas vantagens de uso podem ser destacadas: a precipitação é o único dado de entrada do índice; é adaptado à várias escalas de tempo, sendo útil a estudos agrícolas, hidrológicos e meteorológicos; pode ser usado para comparar regiões com climas diferentes; e pode ser usado tanto para o monitoramento de secas como episódios de excesso de precipitação (ZARGAR et al., 2011).

Mckee, Doesken e Kleist (1993) e a WMO (2006) recomendam que as séries históricas utilizadas nos cálculos do SPI tenham pelo menos 30 anos de dados mensais, sendo que uma série de pelo menos 50 anos é a mais recomendada. Entretanto, séries com essa extensão e completa, são difíceis de se encontrar, uma vez que há falta de comunicação entre empresas públicas e privadas e órgãos de pesquisa, bem como a manutenção e atualização dos dados.

Por ter sido desenvolvido para o monitoramento do impacto de secas em diferentes escalas de tempo, o SPI geralmente é calculado de acordo com o objetivo da pesquisa. A tabela 2 resume como as diferentes escalas de tempo diferem entre si nos estudos de seca segundo Mckee, Doesken e Kleist (1993), WMO E GWP (2016) e Zargar et al. (2011).

Tabela 1- Variações das aplicações do SPI conforme a escala de tempo utilizada (continua)

Escala de Tempo	Fenômeno Refletido	Aplicação
SPI 1-mês	Condições de curto termo	Análise do impacto da seca na umidade do solo e no estresse hídrico em culturas, especialmente no seu crescimento. Não recomendada pra estudos meteorológicos
SPI 3-meses	Condições de curto à médio termo	Utilizada para comparar o volume precipitado entre 3 meses específicos ou estações do ano.
SPI 6-meses	Tendências de precipitação no médio termo	Potencial para analisar se uma estação foi abaixo ou superior à média. No Sudeste do Brasil, pode ser utilizada, por exemplo, para analisar os períodos entre Outubro e Março.
SPI 9-meses	Padrões de precipitação sobre uma escala de tempo média	Se o valor de SPI9 < -1,5, a região pode sofrer impacto substancial na agricultura e possivelmente em outros setores (produção de energia e abastecimento, p. e.)
SPI 12-meses	Padrões de precipitação no longo termo	Valores negativos de SPI podem indicar que não houve recarga dos aquíferos e mananciais, podendo levar a dificuldades no abastecimento de água e produção de energia.

Fonte: Mckee, Doesken e Kleist (1993), WMO E GWP (2016) e Zargar et al. (2011)

O SPI, como ferramenta no estudo de comportamento da seca, vem sendo utilizado em diversos países. Blain e Kayano (2011b) aplicaram o SPI a 118 anos de dados de precipitação para a cidade de Campinas-SP e verificaram que os valores de ENSO (El Niño Southern Oscillation) não influenciaram nas secas ocorrentes sobre a cidade. Zeleke, Giorgi e Zaitchik (2017), ao analisar períodos de seca pela metodologia SPI e o índice de Palmer na Etiópia, observaram que não há tendência clara nas regiões norte, nordeste e central do país, porém o sul e o sudoeste do país são afetados pelo aquecimento do Oceano Atlântico e pela variação da temperatura da superfície do oceano Pacífico.

Karavitis et al. (2011) aplicaram o SPI aos dados de 46 estações meteorológicas da Grécia entre 1947-2004 e verificaram que o índice conseguiu descrever com eficácia os eventos de seca observados e, ainda, recomendam tal índice como ferramenta para categorização (secas severas e brandas, p.e.) e monitoramento desses fenômenos. Livada e Assimakopoulos (2007) analisaram 23 estações meteorológicas com dados mensais durante 51 anos (1950-200) na Grécia através do SPI e destacaram que para o intervalo de 3, 6 e 12 meses as condições de seca são praticamente da mesma magnitude em todo o país.

A relação entre o SPI e outros índices mais complexos demonstram o seu potencial para o estudo do comportamento da seca ao longo do tempo. Akbari et al (2015) analisaram o comportamento da seca na bacia do rio Chenar Rahdar, Sul do Iran, utilizando-se de um índice meteorológico, o SPI, e um hidrológico, o Stream Flow Drought Index (SDI), que é capaz de verificar a seca em cursos d'água. Os autores analisaram uma série de 40 anos (1974-2013) para uma bacia de 178 km² e verificaram uma correlação entre os índices e que os períodos entre 1981-1983 e 2007-2009 foram os mais secos.

Blain et al. (2010) analisaram o comportamento temporal das secas no estado do Espírito Santo através de 4 cidades para séries históricas de pelo menos 30 anos e verificaram um comportamento aleatório, observando que meses extremamente secos podiam ser sucedidos de meses úmidos ou normais. Coelho, Cardoso e Firpo (2016) observaram a série histórica de precipitação sobre a região da Cantareira, em São Paulo, e notaram, através da metodologia SPI, que de 1961-2014, o verão do ano de 2013-2014 foi o mais seco já registrado.

2.3.2. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

O *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* surgiu como uma possibilidade de incluir mais variáveis ao SPI, de forma que mais informações sobre as secas pudessem ser adquiridas. Desenvolvido por Vicente-Serrano, Begueria e López-Moreno (2009) no Instituto Pirenaico de Ecologia in Zaragoza, Espanha, o índice inclui a componente temperatura em seus cálculos, permitindo que o seu efeito na secas fossem avaliados através do balanço hidrológico vertical. SPEI tem uma sensibilidade maior que o SPI em valores negativos extremos, sendo uma ótima ferramenta para monitorar eventos extremos de seca (WMO; GWP, 2016).

Vicente-Serrano, Begueria e López-Moreno (2009) ressaltam que a maioria dos cenários de mudança climática simuladas pelos modelos globais de circulação (GCM) preveem um aumento da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, e, conseqüentemente, um aumento

da temperatura até o fim do século XXI. Os autores apontam que um índice mais sensível a mudanças de temperatura e precipitação se faz necessário no estudo de secas.

Das et al., (2016) estudaram o comportamento e tendência das secas entre 1901 e 2008 para diversos locais da Índia em busca de analisar se a presença de secas foram devido ao déficit de precipitação ou a evapotranspiração potencial. Eles concluíram que o SPEI é sensível na identificação de secas extremas e que as secas na parte leste da Índia foram motivadas, em sua maioria, pela ausência de chuva, enquanto a maioria das secas, na parte oeste do país, foram motivadas pelo aumento da evapotranspiração.

A China é um país muito extenso e com a presença de desertos, montanhas e florestas. Com o objetivo de estudar as regiões áridas do país, Chen e Sun (2015) aplicaram o SPEI para monitorar as características da seca na região para o período de 1961 à 2012. Os autores encontraram um aumento da severidade das secas nas últimas décadas, bem como verificaram que as flutuações da temperatura representam um impacto maior nos episódios de seca do que o déficit de precipitação.

2.4. Mudanças Climáticas e Seus Impactos

A emissão antropogênica de gases do efeito estufa (gás carbônico, metano e óxidos de nitrogênio, principalmente) na atmosfera tem aumentado no planeta Terra desde que a revolução Industrial incluiu a queima de carvão para a geração de energia no século XVIII. Os efeitos da alta concentração desses gases na atmosfera, principalmente devido à ação antrópica, tem sido detectados em todo meio ambiente, sendo considerados a principal causa para o aquecimento do planeta desde a metade do século XX (IPCC, 2015).

Dentre os principais impactos das mudanças climáticas, pode ser destacado o possível aumento da temperatura da superfície terrestre. Hallegatte e Mach (2016) afirmam que os cenários mais otimistas preveem um aumento da temperatura entre 1,5°C e 2,0°C. Por outro lado, o Painel Intergovernamental das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (IPCC) projeta que até 2100, a temperatura média do planeta pode subir em mais de 5°C (IPCC, 2015).

Segundo Bellard et al. (2014) desde um simples organismo até biomas completos, todos os níveis de biodiversidade podem ser afetados pelas mudanças climáticas. De maneira geral, as mudanças irão amplificar os riscos já existentes e criar novos riscos, fazendo com que espécie pouco tolerantes possam vir a desaparecer (IPCC, 2014).. Parmesan e Yohe (2002) apontam que os efeitos das mudanças climáticas nas espécies ainda não eram totalmente conhecidos,

porém Hoberg e Brooks (2015), já verificaram o aumento de doenças infecciosas devido as mudanças no clima.

Vários setores da economia de um país podem ser afetados pelas mudanças climáticas. A agricultura também é uma vertente que pode ser afetada. O excesso ou a falta de água, por exemplo, são fatores que podem alterar significativamente com as mudanças climáticas, levando a uma crise de alimentos em todo mundo (HALLEGATTE; MACH, 2016). Burke e Emerick (2016) afirmam que as duas principais culturas americanas, o milho e a soja, sofreram negativamente nas últimas décadas devido a mudanças de temperatura e nos volumes precipitados. De maneira geral, transporte, infraestrutura, captação e distribuição de água e turismo são, por exemplo, setores sensíveis a eventos extremos (IPCC, 2012).

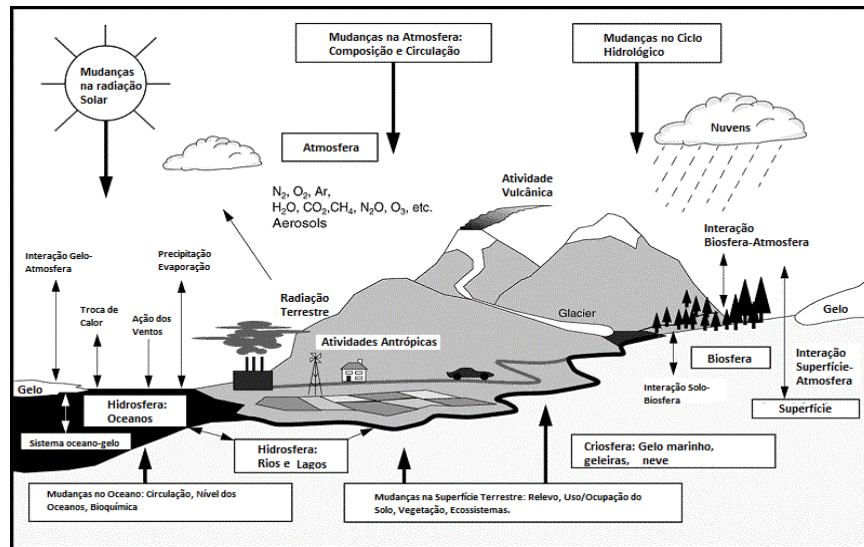
Os estado de Minas Gerais e São Paulo baseiam parte de sua economia no setor agrícola, sendo o café um dos seus principais produtos. Assad et al. (2004), ao simularem o cenário futuro da produção cafeeira em 100 anos, concluiu que as mudanças climáticas podem afetar cerca de 95% das áreas cultiváveis. Além disso, esses estados podem passar a lidar com doenças reemergentes como a Leishmaniose e a febre amarela, fator que pode implicar diretamente na realocação de verbas para a saúde pública (PETERSON; SHAW, 2003).

A produção hidroelétrica brasileira, principal fonte de energia do país, também pode ser afetada diretamente pelas mudanças climáticas. A falta de chuvas pode diminuir o potencial de produção de energia brasileiro, elevando a utilização de outras fontes de combustíveis para suprir o déficit de energia e aumentando o preço da energia repassado aos consumidores (LIMA, 2014). Van Vliet et al. (2016) ao simularem os impactos das mudanças climáticas, concluíram que as hidroelétricas da América Sul podem produzir 5,5% menos energia em média do que produzem hoje.

2.5. Modelos Climáticos de Previsão

Segundo Marengo et al. (2016), Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (GCMs) são modelos matemáticos que tentam expressar da maneira mais fiel possível processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera e suas interações com outros componentes de outros sistemas. Tais modelos levam em consideração mudanças no uso da terra e das concentrações de gases de efeito estufa, simulando diferentes cenários e eventos (PBMC, 2014). A Figura 2 mostra os componentes do clima global e suas interações, mostrando toda a complexidade dos modelos climáticos.

Figura 1- Componentes do clima global e suas interações



Fonte: IPCC (2015)

Marengo et al. (2016) ainda definem os modelos como sendo códigos computacionais com milhares de linhas que tentam expressar o mais corretamente expressões e equações matemáticas para modelar a termodinâmica, a continuidade, hidroestática, hidrodinâmica, conservação da energia e massa.

O quinto Relatório do IPCC trouxe evoluções nos modelos de simulação climática global, mostrando que há um maior uso de simulação e que os mesmos passaram a incorporar o ciclo do carbono, do enxofre e do ozônio, o que confere a estes maior confiabilidade (FLATO et al., 2013). Os modelos climáticos tem sido cada vez mais usados para a simulação futura de diversos seguimentos socioeconômicos e ambientais, logo sua regionalização e o consequente aumento da resolução espacial e temporal dos modelos se faz necessário (CHOU et al., 2014a).

2.5.1. MIROC5

MIROC ou Modelo Interdisciplinar para Pesquisas do Clima foi desenvolvido em conjunto pelo Centro para Pesquisas de Sistemas Climáticos (CCSR), Universidade de Tóquio e o Instituto Nacional para Pesquisas do Meio Ambiente (NIES) e Agência Japonesa para Ciência e Tecnologia Marinha e Terrestre, ambas japonesas (WATANABE et al., 2010). O modelo MIROC5 foi atualizado e desenvolvido para o quinto relatório do IPCC de forma que sua parametrização englobasse os componentes atmosféricos e oceânicos e superasse o MIROC3, atingindo 50 níveis atmosféricos. (TATEBE et al., 2012).

O modelo MIROC5 vem sendo utilizado para simulações do clima em diversas regiões do planeta. Hirota et al. (2011) analisaram o quão eficiente o modelo MIROC5 é capaz de reproduzir os eventos de chuva sobre as regiões tropicais do planeta e verificaram que essa versão é melhor do que as anteriores e tem uma relação mais fraca com o temperatura da superfície do oceano (SST).

Chou et al. (2014a) analisaram o impacto das mudanças climáticas na América do Sul até o final do século XXI sobre dois cenários diferentes, 4.5 e 8.5, e verificaram que de maneira geral, o modelo MIROC5, acoplado à um modelo regional Eta, tende a superestimar os valores de precipitação nas épocas chuvosas e a subestimar os valores de precipitação nas épocas mais secas.

Okazaki et al. (2012) analisaram os possíveis impactos que as mudanças climáticas podem causar na incidência futura de inundações e cheias em rios através de dois cenários futuros (4.5 e 8.5). Os resultados mostraram que poderá haver grandes inundações na Ásia, África, Oceania e América do Sul e que o cenário 8.5 é mais pessimista que o 4.5. Na Europa e na América do Norte, por outro lado, o modelo MIROC5 mostrou apenas um possível pequeno aumento na incidência de inundações.

2.5.2. HadGEM2-ES

O HadGEM2-ES é um modelo desenvolvido pelo Hadley Centre, em Londres, cujo objetivo é simular e entender o clima futuro a partir de respostas de equações que descrevam processos químicos, biológicos e físicos dentro da atmosfera, oceano, criosfera e biosfera marinha e terrestre (COLLINS et al., 2011). A resolução do modelo é de cerca de 18,75 graus em longitude e 12,75 graus em latitude, atingindo 38 níveis na atmosfera (CHOU et al., 2014b).

Good et al. (2012) estudaram o possível impacto de mudanças climáticas no século XXI em florestas do mundo. Os autores verificaram que o modelo sugere que a Floresta Amazônica pode não ser afetada no futuro e que o principal impacto nas florestas pode ser o prolongamento das estações de seca.

Chou et al. (2014a) acoplaram o modelo Eta ao modelo HadGEM2-ES para avaliar o efeito das mudanças climáticas sobre a América do Sul sobre dois cenários diferentes e verificaram que, de maneira geral, o modelo tende a subestimar o volume de precipitações, distribuindo seu valor total durante os meses do ano.

2.5.3. Modelo Eta

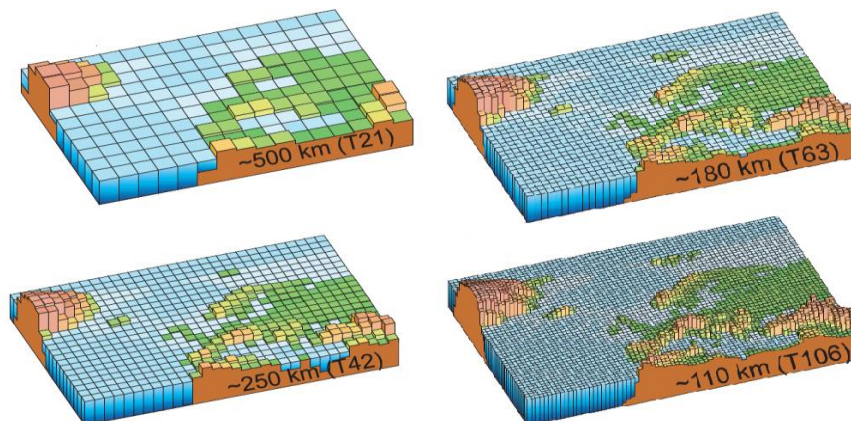
A resolução dos modelos climáticos de simulação giram em torno de 100-300Km, sendo uma boa ferramenta na macro escala, mas de difícil utilização na escala local, devido a falta de detalhamento da superfície terrestre, que pode ser fundamental para determinar impactos em áreas urbanas ou plantações (CHOU et al., 2014b). A criação de um modelo regional, ou a regionalização dos modelos globais de simulação climática se faz necessária.

O modelo ETA foi proposto em 1984 por Mesinger (1984) em conjunto com o Instituto Hidrometeorológico da Sérvia e Universidade de Belgrado e aperfeiçoado por Black (1994) através do Centro Meteorológico dos Estados Unidos, atingindo assim uma resolução de 30Km e 50 níveis na atmosfera. Atualmente, a resolução dos modelos pode chegar a 5Km.

O modelo Eta é usado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) desde 1997 para previsões do tempo e desde 2002 para previsões de estações do ano (CHOU et al., 2014a).

A figura 2 exemplifica como a mudança na resolução de um modelo pode alterar significativamente o detalhamento da superfície terrestre. Observa-se que quanto menor a resolução mais precisa e a descrição da superfície.

Figura 2- Impacto do aumento da resolução espacial no detalhamento da superfície terrestre da Europa.



Fonte: (IPCC, 2015)

2.6. Cenários do IPCC

Projetar as mudanças climáticas é simular como as ações humanas ou atividades naturais irão afetar a humanidade em décadas ou séculos. Nesse contexto, definir os cenários é

importante, uma vez que se estabelecem o uso da terra e as forças radiativas em situações hipotéticas de emissão de gases do efeito estufa na atmosfera (COLLINS et al., 2013)

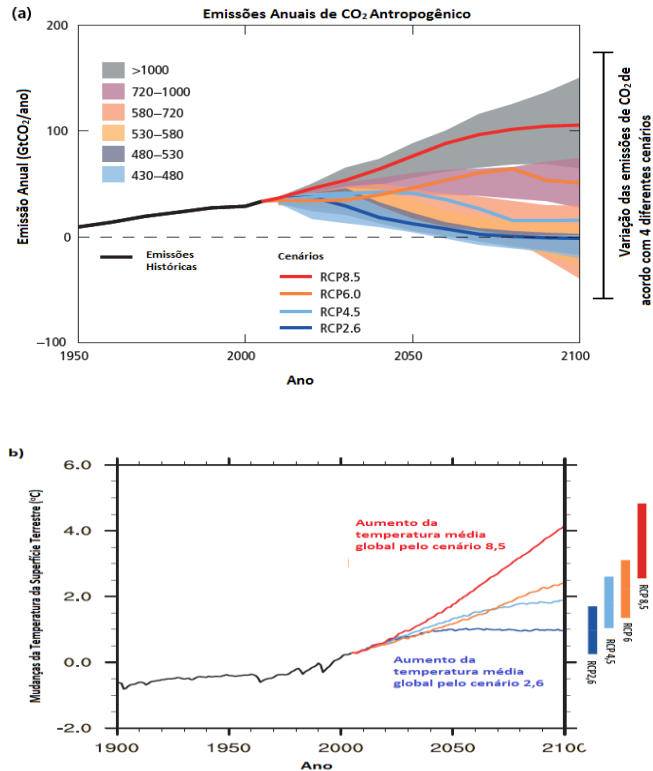
As emissões antropogênicas de gases do efeito estufa na atmosfera são causadas, principalmente, pelo tamanho da população, suas atividades econômicas, seu estilo de vida, pelo consumo de energia, pelos padrões de uso da terra e por políticas climáticas (IPCC, 2015).

Os cenários, ou Representative Concentration Pathways (RCP), especificam diferentes emissões de gases do efeito estufa na atmosfera e suas concentrações na atmosfera. Cubasch et al. (2013), através do quinto relatório do IPCC, definem quatro diferentes cenários de forças radiativas até 2100, sendo 2.6, 4.5, 6 e 8.5 $W.m^{-2}$.

As forças radiativas designadas para os cenários são convertidas em concentrações de gases do efeito estufa e, conseqüentemente em suas emissões. Essas emissões e concentrações são inputs para os modelos climáticos, que passam então a gerar as projeções futuras de mudanças climáticas.

A temperatura do planeta irá continuar a crescer caso as emissões de gases do efeito estufa continuem a crescer. Segundo Collins. et al. (2013) cada cenário traz um aumento da superfície terrestre diferente, sendo de 0,3 a 2,6°C para o RCP2.6, de 1,1 a 2,6°C para o RCP4.5, de 1,4 a 3,1°C para o RCP6 e de 2,6 a 4,8°C para o RCP8.5. A figura 3a demonstra como os diferentes cenários simulam o aumento de emissões de CO₂ até 2100 e a figura 3b como a temperatura média da superfície terrestre poderá alterar seguindo diferentes cenários.

Figura 3- a) Emissões de CO₂ simuladas para diferentes RCPs até o final do século XXI. b) Simulação do aumento da temperatura Global do planeta para diferentes cenários até 2100



Fonte: IPCC (2015)

3. Referências

AKBARI, H. et al. Drought Analysis Based on Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI) in Chenar Rahdar River Basin , Southern Iran. **Watershed Management** 2015, p. 11–22, 2015.

ALSTON, M.; KENT, J. **Social Impacts of Drought: A report to NSW Agriculture** A report to NSW Agriculture. Wagga Wagga/ Australia: [s.n.].

ANDEREGG, W. R. L. Spatial and temporal variation in plant hydraulic traits and their relevance for climate change impacts on vegetation. **New Phytologist**, v. 205, n. 3, p. 1008–1014, 2015.

ANEEL, A. N. DE E. E.-. **Capacidade Instalada por Estado**. Brasília-DF: 2018 Disponível em:

<<https://www.google.com.br/search?q=aneel&oq=aneel&aqs=chrome..69i57j69i60j0l2j69i60l2.1316j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>.

ASSAD, E. D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil Pesquisa Agropecuária Brasileira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 39, p. 1057-

1064, 2004

BELLARD, C. et al. Impacts of Climate Change on the Future of Biodiversity. **Ecology Letters**, v. 15, n. 4, p. 365–377, 2014.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265–278, 1994.

BLAIN, G. C. et al. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1067–1073, 2010.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. **118 anos de dados mensais do Índice Padronizado de Precipitação: série meteorológica de Campinas, estado de São Paulo** *Revista Brasileira de Meteorologia* scielo, , 2011a.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 ANOS DE DADOS MENSAIS DO ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO: SÉRIE METEOROLÓGICA DE CAMPINAS , ESTADO DE SÃO PAULO. p. 287–294, 2011b.

BURKE, M.; EMERICK, K. Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 8, n. 3, p. 106–140, 2016.

CALOIERO, T. et al. **An Analysis of the Occurrence Probabilities of Wet and Dry Periods through a Stochastic Monthly Rainfall Model** *Water* , 2016.

CHANDA, K.; MAITY, R. Meteorological Drought Quantification with Standardized Precipitation Anomaly Index for the Regions with Strongly Seasonal and Periodic Precipitation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 12, p. 6015007, 2015.

CHEN, H.; SUN, J. Changes in drought characteristics over china using the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5430–5447, 2015.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. December, p. 512–525, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512–527, 2014b.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 769–784, 2016.

COLLINS, M. et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.). . **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

COLLINS, W. J. et al. Model Development Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, p. 1051–1075, 2011.

COPASA. **Nível dos Reservatórios de Belo Horizonte e Nova Lima**. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/abastecimento-de-agua/nivel-dos-reservatorios>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

CUBASCH, U. et al. Introduction. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.). . **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

DAS, P. K. et al. Trends and behaviour of meteorological drought (1901–2008) over Indian region using standardized precipitation–evapotranspiration index. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 909–916, 1 fev. 2016.

ELÉTRICA, D. DE Á. E E. **Nível do Rio Piracicaba**. Disponível em: <<https://www.saisp.br/geral/Processo.whtml?USERID=PuB&produto=56&ovlCode=ESP&OK=OK&BACKCOLOR=1&whichCode=0>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

ELKIN, C. et al. Short- and long-term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests in the European Alps. **Ecological Applications**, v. 25, n. 4, p. 1083–1098, 2015.

FLATO, G. et al. Evaluation of Climate Models. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [s.l: s.n.]. p. 741–866.

GOOD, P. et al. Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC. **Journal of Climate**, v. 26, n. 2, p. 495–511, 27 abr. 2012.

GOUVEIA, C. M. et al. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region:

An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. **Global and Planetary Change**, v. 151, n. July, p. 15–27, 2017.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

HALLEGATTE, S.; MACH, K. J. Make climate-change assessments more relevant. **Nature**, v. 534, n. 7609, p. 613–615, 2016.

HAYES, M. Drought Indices. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. July, p. 18, 2002.

HIROTA, N. et al. Precipitation Reproducibility over Tropical Oceans and Its Relationship to the Double ITCZ Problem in CMIP3 and MIROC5 Climate Models. **Journal of Climate**, v. 24, n. 18, p. 4859–4873, 19 jul. 2011.

HIRSCHI, M. et al. Using remotely sensed soil moisture for land-atmosphere coupling diagnostics: The role of surface vs. root-zone soil moisture variability. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 246–252, 2014.

HOBERG, E. P.; BROOKS, D. R. Evolution in action: climate change, biodiversity dynamics and emerging infectious disease. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 370, n. 1665, p. 1–7, 2015.

IBGE. **Cidades de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>>>.

IPCC. **Climate Change 2014 Synthesis Report**. Genebra, Suíça: p. 151. 2015

JOSÉ WANDERLEY MARANGON LIMA. Introdução. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (Eds.). . **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: 2016. p. 423.

KARAVITIS, C. A. et al. **Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece** *Water*, 2011.

KRISHNAN, P. et al. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 3–4, p. 208–223, 2006.

- LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554, 2011.
- LIVADA, I.; ASSIMAKOPOULOS, V. D. Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 89, n. 3, p. 143–153, 2007.
- MARENGO, J. A. et al. 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. et al. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013.
- MARENGO, J. A. et al. Bases para modelagem de mudanças climáticas. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (Eds.). . **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 423.
- MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v. 106, n. September 2015, p. 31–44, 2015.
- MARKHAM, C. G.; MCLAIN, D. R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, northeastern Brazil. **Nature**, v. 265, p. 320–325, 1977.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology**, n. January, p. 17–22, 1993.
- MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1, p. 195–202, 1984.
- MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203–214, 2015.
- NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. **Tellus**, v. 4, p. 336–343, 1972.
- OKAZAKI, A. et al. Changes in Flood Risk under Global Warming Estimated Using MIROC5 and the Discharge Probability Index. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 90, n. 4, p. 509–524, 2012.
- OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. et al. **Relação Entre o Standardized Precipitation Index (SPI) e**

os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia Floresta e Ambiente scielo , , 2017.

OTKIN, J. A. et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218–219, p. 230–242, 2016.

OTTO, J. et al. Forest summer albedo is sensitive to species and thinning: How should we account for this in Earth system models? **Biogeosciences**, v. 11, n. 8, p. 2411–2427, 2014.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. Washington, D.C: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>>.

PANDEY, R.; S. RAMASASTRI, K. **Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency**. [s.l: s.n.]. v. 15

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature(London)**, v. 421, p. 37–42, 2002.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE, 2014.

PETERSON, A. T.; SHAW, J. Lutzomyia vectors for cutaneous leishmaniasis in Southern Brazil: Ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. **International Journal for Parasitology**, v. 33, n. 9, p. 919–931, 2003.

RAO, V. B.; HADA, K.; HERDIES, D. L. On the severe drought of 1993 in north-east Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 15, n. 6, p. 697–704, 1995.

SANASA. **INFORMAÇÕES SOBRE INTERRUPÇÕES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2014/10/campinas-tem-5-dia-seguido-de-falta-de-agua-com-20-da-cidade-afetada.html>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

SCHLESINGER, W. H. et al. Forest biogeochemistry in response to drought. **Global change biology**, v. 22, n. 7, p. 2318–2328, 2016.

SMITH, L. T. et al. Drought impacts on children’s respiratory health in the Brazilian Amazon.

Scientific Reports, v. 4, p. 1–8, 2014.

STEFAN HASTENRATH; HELLER, L. Dynamics of Climatic Hazards in northeast Brazil. **Quartely Journal Real Meteorology Society**, v. 103, p. 77–92, 1977.

TATEBE, H. et al. The Initialization of the MIROC Climate Models with Hydrographic Data Assimilation for Decadal Prediction. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 90A, p. 275–294, 2012.

VAN VLIET, M. T. H. et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 375, 4 jan. 2016.

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, 19 nov. 2009.

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

WEHNER, M. et al. Projections of Future Drought in the Continental United States and Mexico. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, n. 6, p. 1359–1377, 12 maio 2011.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: Concepts and Definitions. In: **Drought: A Global Assessment**. 1st Editio ed. London: Routledge Publishers, 2000. v. 69p. 3–18.

WILLIAMSON, G. B. et al. Amazonian tree mortality during the 1997 El Nino drought. **Conservation Biology**, v. 14, n. 5, p. 1538–1542, 2000.

WMO; GWP. **Handbook of drought indicators and indices**. Genebra, Suíça: [s.n.].

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought monitoring and early warning : concepts , progress and future challenges**. [s.l: s.n.].

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Genebra, Suíça: [s.n.].

YANG, J. X.; LIJUAN, X. C.; YOU MIN, W. RESEARCH ON DETERMINATION OF STATION INDEXES AND DIVISION OF REGIONAL FLOOD/ DROUGHT GRADES IN CHINA. **Quartely Journal of Applied Meteorology**, v. 8, n. 1, p. 26–33, 1997.

ZARGAR, A. et al. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.

ZELEKE, T. T.; GIORGI, F.; ZAITCHIK, B. F. Trend and periodicity of drought over Ethiopia. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY**, 2017.

ZENG, N. et al. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, 2008.

SEGUNDA PARTE- CAPÍTULOS

CAPÍTULO 1

Frequência de Eventos de Seca na Região Sudeste do Brasil

SILVA, V.O. e MELLO, C. R. de

Resumo

Episódios anômalos de seca são fenômenos climáticos que afetam negativamente uma região. Seus efeitos podem ser observados na agricultura, pecuária, abastecimento de água, produção de energia elétrica e turismo. O objetivo deste estudo foi analisar, com base nos índices SPI (“*Standard Precipitation Index*”) e SPEI (“*Standard Precipitation Evapotranspiration Index*”), a frequência de secas no centro-sul da região Sudeste do Brasil, caracterizada por três regiões metropolitanas (São Paulo: RM-SP; Campinas: RM-Campinas; e Belo Horizonte: RM-BH), a região sul de Minas Gerais (Lavras) e a região centro-leste de São Paulo (Piracicaba). Os resultados evidenciaram que o período entre 2013 e 2015 foi o mais seco já observado para a região Sudeste do Brasil, com anos consecutivos de volumes baixos de precipitação acompanhados de altas temperaturas. O déficit de precipitação no período de Dezembro a Março (Verão) favoreceu a ocorrência de secas com maior impacto, uma vez que neste período observou-se, em média, 75% do volume total de chuvas esperadas para todo o período chuvoso (Outubro a Março). A utilização do SPEI mostrou ser relevante para identificação de períodos secos uma vez que este é sensível aos efeitos da temperatura, conforme ficou demonstrado para a RM-SP e centro-leste do estado de São Paulo. Contudo, o SPI também foi capaz de identificar anomalias climáticas mais intensas, tendo sido eficiente para identificar esses efeitos nas demais regiões estudadas. Para as cidades de Lavras, Nova Lima, Campinas e Piracicaba observou-se que os resultados do SPI e SPEI são semelhantes e ambos os índices são recomendados para a identificação de eventos de seca. Assim, ficou evidenciado que a região Sudeste apresenta vulnerabilidade climática importante a episódios de seca e que a compreensão deste fenômeno consiste de uma ferramenta importante para subsidiar gestores públicos e privados na região sudeste.

Palavras-chave: Índices de Seca, episódios anômalos de seca, recursos hídricos, climatologia

1. Introdução

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela abundância de seus recursos hídricos. A maior parte de suas reservas superficiais de água doce, porém, está concentrada na região Norte do país, distante das regiões mais populosas e com atividades econômicas mais intensas. Diversas regiões metropolitanas das regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil tem enfrentado, então, grandes problemas com abastecimento de água.

Chanda e Maity (2015) definem seca como a ausência de precipitação ou como um volume insuficiente de precipitação sobre uma região em um determinado período. Caloiero et al. (2016) a descrevem como um desequilíbrio natural temporário na disponibilidade de água em níveis abaixo da média histórica, que podem causar impactos na agricultura, no abastecimento e na economia de forma geral. A seca difere da aridez, que é restrita a regiões em que historicamente há baixos totais precipitados e é uma característica permanente do clima, como as regiões desérticas e semiáridas (WMO; GWP, 2016).

Eventos de seca geralmente estão associados à redução significativa da precipitação e, ou às altas temperaturas. Otkin et al. (2016) analisaram os efeitos da seca na região central dos Estados Unidos em 2012 e verificaram uma alteração da umidade do solo na camada de 0 a 10 cm, na qual a maioria das culturas anuais utilizam para retirada de água. Os autores observaram uma perda rápida de água próxima ao solo devido à altas temperaturas e ausência de chuva. Outros fenômenos como a desertificação e a diminuição da fertilidade do solo também podem estar diretamente relacionados a falta de chuva e altas temperaturas sobre uma região (HIRSCHI et al., 2014; KRISHNAN et al., 2006; OTTO et al., 2014). Diversos eventos afetaram o Brasil nas últimas décadas, destacando-se as secas na Amazônia em 2005, 2010 e 2015 e a crise hídrica de 2001, que levou ao racionamento de energia elétrica. Zeng et al. (2008) verificaram os impactos da seca de 2005 sobre a região Amazônica e observaram que apesar do evento não ter apresentado valores muito abaixo das médias históricas, o acúmulo de anos secos consecutivos (2002-2005) resultou na redução de 16% do volume de água na foz do rio Amazonas e um aumento de 100% na ocorrência de queimadas. Marengo et al. (2011) observaram que a seca de 2010 sobre a Amazônia foi ainda mais severa do que a de 2005, sendo o pior evento já registrado no período de 1903 a 2010.

Índices para análise de frequência e intensidade de secas são ferramentas que agregam e simplificam informações através de um valor de fácil entendimento. Dessa maneira, índices que utilizam somente valores de precipitação, como o Standard Precipitation Index (SPI)

(MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) e o China-Z Index (CZI) (YANG; LIJUAN; YOU MIN, 1997), e índices que utilizam o balanço hídrico atmosférico, como Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2009) e o Índice de Palmer (PALMER, 1965), surgiram como ferramentas importantes para o entendimento da frequência de ocorrência de secas e suas intensidades.

O *Standard Precipitation Index* (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) reflete a frequência com que eventos de seca ocorrem, sua duração e o intervalo de tempo entre esses eventos (WMO; GWP, 2016). Devido à sua simplicidade e ampla utilização nos estudos de episódios de seca (HAYES, 2002), o SPI foi sugerido, em 2009, pela Organização Meteorológica Mundial como a principal ferramenta no monitoramento desses eventos (WMO; GWP, 2016). Entre suas vantagens, destacam-se: a precipitação é o único dado de entrada do índice; é adaptado a várias escalas de tempo, sendo útil a estudos agrícolas, hidrológicos e meteorológicos; pode ser usado para comparar regiões com climas diferentes; e pode ser usado tanto para a identificação de secas como para a identificação de enchentes e alagamentos. (ZARGAR et al., 2011).

O *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI) foi desenvolvido e proposto por Vicente-Serrano et al. (2009), agregando a temperatura em seus cálculos por meio da estimativa da evapotranspiração potencial. Assim, os eventos de seca podem ser avaliados através do saldo do balanço hídrico atmosférico ($P - ET$), refletindo no déficit hídrico. O SPEI tem sensibilidade maior que o SPI em valores negativos extremos, consistindo de uma importante ferramenta para avaliar a ocorrência de eventos de seca anômalas especialmente vinculadas ao aumento de temperatura (WMO; GWP, 2016).

Os estados de São Paulo e Minas Gerais possuem juntos mais de 30% da população brasileira, 40% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e um quarto de toda a capacidade de geração de energia hidroelétrica (ANEEL, 2017; IBGE, 2016). Entre 2013 e 2015, ambos os estados enfrentaram um período de estiagem muito intenso, em que foram registrados volumes de chuva muito abaixo das médias históricas para período chuvoso (Outubro a Março – P6) e para o verão (Dezembro a Março – P4). Durante o ano hidrológico 2013-2014, foi observada possivelmente uma das secas mais extremas já registradas sobre a Serra da Cantareira, principal região hidrológica responsável pelo abastecimento de água para a RM-SP, o que contribuiu para que se alcançasse o volume mais baixo já registrado entre 1960 e 2015 (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016; MARENGO et al., 2015). No mesmo período, o Rio Piracicaba, na região centro-leste do estado de São Paulo, atingiu a menor vazão em 30 anos, com uma profundidade média

de 79 cm (DAEE, 2018). Ainda no estado de São Paulo, a RM - Campinas sofreu com diversos dias de racionamento e com o aumento dos níveis de poluentes nos cursos d'água. Devido a isso, foram necessárias a adição de 500% a mais de cloro no tratamento de água proveniente do rio Atibaia, cujo volume chegou a 30% abaixo do que é recomendado para o atendimento de toda população (SANASA, 2014). Em Minas Gerais, dados da COPASA (2018) apontaram que o reservatório de Serra Azul, uma dos principais fontes para o abastecimento da RM - BH, a terceira maior do país, alcançou 5,8% de sua capacidade total. No sul de Minas Gerais, o reservatório de Furnas atingiu menos de 20% de sua capacidade, e outras Usinas Hidrelétricas da região produziram menos de 30% da capacidade instalada (BUENO, MELLO e ALVES, 2016). Além disso, a produção de café arábica na região, a principal do mundo, apresentou um déficit de quase 6 milhões de sacas entre 2013 e 2015, sendo que este produto é um dos principais responsáveis pelas exportações do país.

O presente estudo foi realizado com base em dados históricos registrados em 5 cidades da região centro-sul do Sudeste do Brasil, representando três das principais regiões metropolitanas do país (São Paulo e Belo Horizonte e Campinas), a região Sul de Minas Gerais, notadamente importante pelo potencial de geração hidrelétrica e produção de café de alta qualidade (Lavras), e a região centro-leste do estado de São Paulo (Piracicaba), cujo potencial agrícola, especialmente associado a cana-de-açúcar, é estratégico para a produção de bioenergia no Brasil.

O objetivo desse estudo foi analisar o comportamento temporal e a frequência de eventos de seca nas regiões acima mencionadas, correspondendo à região centro-sul do Sudeste do Brasil, aplicando dois índices de seca, o Standard Precipitation Index (SPI) e o Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI).

2. Material e Métodos

2.1. Base de Dados

Para o desenvolvimento do presente estudo foram utilizados dados de 5 estações meteorológicas localizadas em Lavras e Nova Lima, no estado de Minas Gerais, e Campinas, São Paulo e Piracicaba, no estado de São Paulo. A escolha dessas estações foi baseada na extensão das séries históricas para permitir uma análise de frequência de ocorrência mais robusta, de forma que possuíssem pelo menos 70 anos de dados de precipitação. É importante

destacar a dificuldade de se obter séries históricas tão longevas mesmo de precipitação, no Brasil. Além disso, cada uma dessas localidades tem sua importância no contexto regional e nacional. Assim, a cidade de Lavras, com 101 anos de dados, representa o sul de Minas Gerais, região com alto potencial para geração de energia hidrelétrica (bacia do rio Grande), tendo-se o reservatório de Furnas o maior e mais importante do Sudeste, além de ser a principal região produtora de café arábica do mundo. O posto pluviométrico de Nova Lima, na RM-BH, possui 161 anos de dados, com as medições sendo realizadas desde meados do Império. A RM-BH é a terceira do país, com quase 5 milhões de habitantes. A estação meteorológica do IAG/USP localizada na cidade de São Paulo, também cedeu sua série histórica de precipitação, cujo início se deu em 1933. Dados da estação meteorológica da ESALQ/USP, na cidade de Piracicaba, cobrem um período de 98 anos. A região de Piracicaba, no centro-leste do estado de São Paulo, possui um dos maiores Produto Interno Bruto (PIB) agrícola do país, responsável por expressiva produção de bionergia. Finalmente, a RM-Campinas é a 4ª região metropolitana do Sudeste, sendo a 10ª do país, com uma atividade agroindustrial das mais relevantes. A estação meteorológica do IAC forneceu os dados de precipitação que cobriram um período de 126 anos, uma das mais extensas disponíveis. Apesar das regiões mencionadas serem espacialmente amplas, com vários microclimas, entende-se que para os objetivos desse estudo, que é baseado em séries de precipitação acumuladas de 4 e 6 meses, essa variabilidade é reduzida, podendo-se entender esses dados como razoavelmente representativos.

Na Figura 1 apresenta-se a localização das cidades que abrigam as observações meteorológicas aplicadas ao estudo e sua inserção no quadrante de seca observado por Coelho et al. (2015) e Nobre et al. (2016) referente ao ano hidrológico 2013/2014. Na Tabela 1 apresentam-se características geográficas das estações aplicadas ao estudo, tipo climático baseado na classificação de Köppen atualizado com base nas últimas normais climatológicas (1981 a 2010), tamanho das séries históricas disponíveis para o estudo com base no SPI e no SPEI, e importância resumida das respectivas regiões.

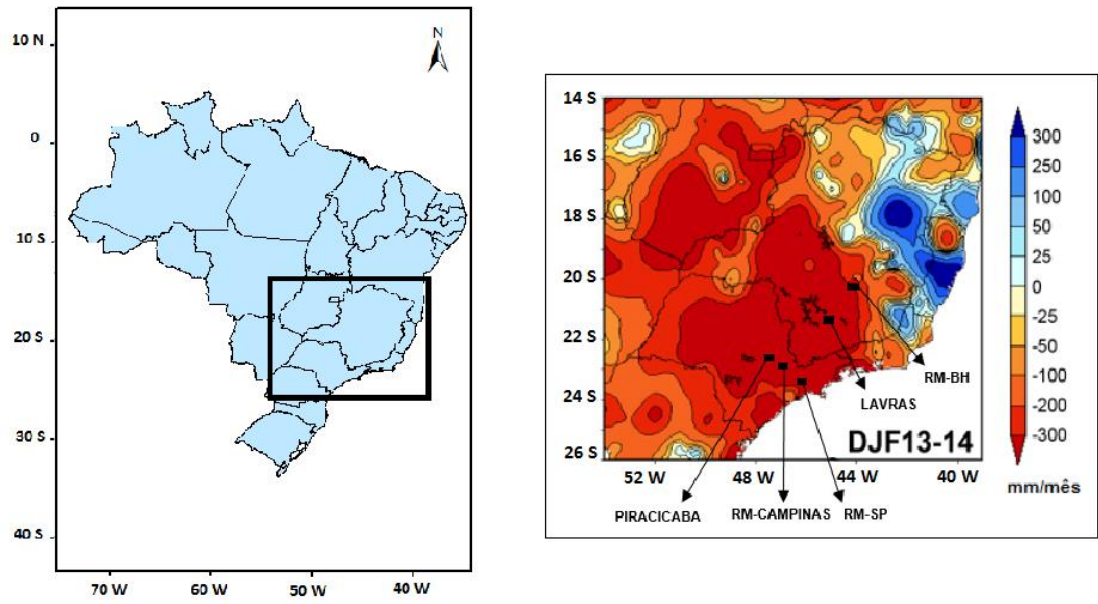


Figura 1. Localização geográfica das estações meteorológicas aplicadas ao presente estudo e sua inserção no quadrante de seca do Sudeste do Brasil caracterizado por Nobre et al. (2016) e Coelho et al. (2015)

Tabela 1. Características gerais dos postos meteorológicos utilizados no estudo.

Posto	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Altitude (m)	Clima	Série histórica (SPI)	Série histórica (SPEI)	Concentração da precipitação, em % (P4/P6)	Região/Relevância
Lavras (sul de Minas Gerais) (INMET)	21,75°	45°	918,84	Cwa	1915 - 2016	1961 - 2016	85,23	Região Sul de Minas Gerais; 4 reservatórios de UHE, com destaque para Furnas (o maior reservatório do SE do Brasil); principal região produtora de café Arábica do mundo;
Nova Lima (RM-BH) (ANA; INMET)	19,98°	43,85°	770,0	Aw	1865 - 2016	1961-2016	87,89	Região metropolitana de Belo Horizonte, a terceira do país, abastecimento seriamente afetada pela seca de 2013-2015;
São Paulo, SP (IAG/USP; INMET)	23,6°	46,4°	819,0	Cwa	1933 - 2016	1982 - 2016	74,41	Maior região metropolitana da América Latina, altamente dependente de reservatórios superficiais para abastecimento; seriamente afetada pela seca de 2013-2015;
Piracicaba, SP (Centro-leste de SP; Estação ESALQ/USP)	22,6°	47,75°	546,0	Cwa	1917 - 2015	1917 - 2015	77,77	Região centro-leste do estado de São Paulo, responsável pela maior área de cultivo de cana-de-açúcar e produção de combustível; seriamente afetada pela seca de 2013-2015, com nível mais baixo já registrado no rio Piracicaba;
Campinas, SP (RM – Campinas; estação IAC)	22,9°	47,08°	669,0	Cwa	1890 - 2016	1961 - 2016	78,29	4ª região metropolitana do Sudeste do Brasil, com mais de 2 milhões de habitantes; altamente dependente de recursos hídricos superficiais e muito afetada pela seca 2013-2015

*Com base nas Normais Climatológicas de 1981-2010; **Com base nos dados do posto meteorológico.

2.2. Análise Exploratória dos Dados

Foram utilizadas séries históricas de precipitação dos 4 (Dezembro/Março – Verão – P4) e 6 (Outubro/Março – Período Chuvoso – P6) meses mais chuvosos do ano hidrológico (Outubro a Setembro na região sudeste do Brasil). A escolha dos meses mais chuvosos foi feita como função da análise do impacto das secas na estação chuvosa, uma vez que o clima do Sudeste do Brasil se caracteriza por verão chuvoso e inverno seco (Tabela 1). As séries históricas de precipitação de Piracicaba, São Paulo, Lavras e Campinas não apresentaram falhas; contudo, a série de Nova Lima apresentou falhas entre 2002 e 2016. Para seu preenchimento, foi realizada, primeiramente, uma análise de consistência dos dados com verificação de homogeneidade da série histórica. Para a construção da curva de dupla massa foram utilizados os dados das estações meteorológicas do INMET das cidades de Ibitiré (20°S, 44°W e 814,54m) e Belo Horizonte (19,93°S, 43,93°W e 915m), os quais foram aplicados por meio de regressão para o preenchimento destas falhas (MELLO; SILVA, 2013).

Foram utilizados dados de temperatura média mensal para os meses de Outubro a Março para o cálculo da evapotranspiração potencial com base no método de Thornthwaite, visando à aplicação do SPEI, conforme Vicente-Serrano et al. (2009). As séries de São Paulo, Piracicaba e Campinas não apresentaram falhas. Para o preenchimento de falhas referentes a Lavras e Nova Lima foi utilizado o software PGECLIMA_R (Kist e Virgens Filho, 2014; Vorgens Filho et al. (2013). As séries de evapotranspiração potencial assim desenvolvidas cobriram os respectivos períodos apresentados na Tabela 1.

Para verificação de tendência temporal na série histórica o teste de Mann-Kendal foi aplicado (Mann, 1945; Kendall, 1975). Este teste considera a hipótese de estabilidade temporal, em que observações consecutivas ocorrem de forma independente e não há alteração da distribuição de probabilidades no tempo, ou seja, a série é considerada estacionária.

2.3. Standard Precipitation Index (SPI)

Para o cálculo do SPI, aplicou-se a função densidade de probabilidades (FDP) Gama 2 parâmetros para modelar as frequências das séries históricas de precipitação de 4 e 6 meses (SPI4 e SPI6, respectivamente), conforme Mckee et al. (1993) e Coelho et al (2016), ajustada com base no método da máxima verossimilhança.

$$FDP: f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha * \Gamma(\alpha)} * x^{\alpha-1} * e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

Sendo β e α os parâmetros de posição e escala da FDP.

O SPI é definido como sendo o valor de “z” correspondente a cada frequência de não-excedência estimada pela FDP Gama, o que se obtém a partir da inversa da FDP padronizada de Gauss. A classificação proposta pelo Centro Nacional de Dados Climáticos (NCDC) do Serviço de Administração da Atmosfera e do Oceano dos Estados Unidos (NOAA) divide o SPI em 5 faixas, associando a intensidade das secas: extremamente seco: $SPI < -2$; severamente seco: $-2 \leq SPI < -1.60$; muito seco: $-1.60 \leq SPI < -1.30$; moderadamente seco: $-1.30 \leq SPI < -0.80$; anormalmente seco: $-0.80 \leq SPI < -0.51$.

2.4. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

O Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) analisa além da precipitação, o efeito da temperatura nos episódios de seca a partir da estimativa da evapotranspiração potencial. Vicente-Serrano et al. (2009) sugerem que o efeito da temperatura seja observado através do cálculo da evapotranspiração potencial. O SPEI reflete um déficit hídrico estimado pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial no período considerado ($P - ET$).

Estudos realizados por Begueria et al. (2014) e MCEVOY et al. (2012) encontraram resultados semelhantes para o SPEI utilizando os métodos de Thornthwaite e Penman–Monteith, sendo o primeiro indicado para o cálculo na ausência de dados meteorológicos mais detalhados. Dessa maneira, adotou-se para o cálculo da evapotranspiração potencial, em mm, o método de Thornthwaite (1948) como sugerido por Vicente-Serrano et al. (2009):

$$ETp = 16K * \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (2)$$

em que T_i é a temperatura média mensal i , em $^{\circ}\text{C}$, e I é calculado pela soma mensal deste, conforme equação 3:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514} \quad (3)$$

Na equação 2, m é o coeficiente que depende de I e pode ser calculado por:

$$m = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (4)$$

K é um coeficiente de correção para a latitude e mês, dado por:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (5)$$

em que NDM é o número de dias no mês e N é o número máximo de horas de sol, que é calculado por:

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) \varpi \quad (6)$$

em que ϖ é a angulação do sol, que é calculada por:

$$\varpi = \arcsin(-\tan\phi \tan\delta) \quad (7)$$

ϕ é a latitude, em radianos, e δ é a declinação do sol, em radianos, calculada por:

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1,405\right) \quad (8)$$

J é o dia juliano médio do mês.

A série histórica de $P - ET$ foi desenvolvida para o período de Outubro a Março (SPEI6), e de Dezembro a Março (SPEI4). Para o cálculo do SPEI foi utilizada a distribuição Generalizada de Extremos (GEV), como sugerida por Stagge e Tallaksen (2014), uma vez que o balanço hídrico não é limitado a zero e a evapotranspiração pode ser maior que a precipitação. A distribuição GEV possui a seguinte estrutura:

$$FDP = \frac{1}{\sigma} * \left[1 - \varepsilon * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(\frac{1}{\varepsilon-1}\right)} * \exp\left\{-\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{\frac{1}{\varepsilon}}\right\} \quad (9)$$

Em que ε , σ e μ são, respectivamente, os parâmetros de forma, escala e posição. Se o valor de $\varepsilon < 0$, a GEV representa a forma assintótica de valores mínimos e existe se

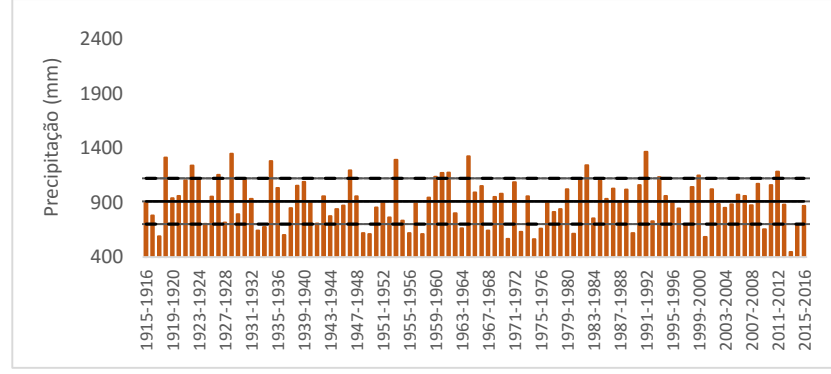
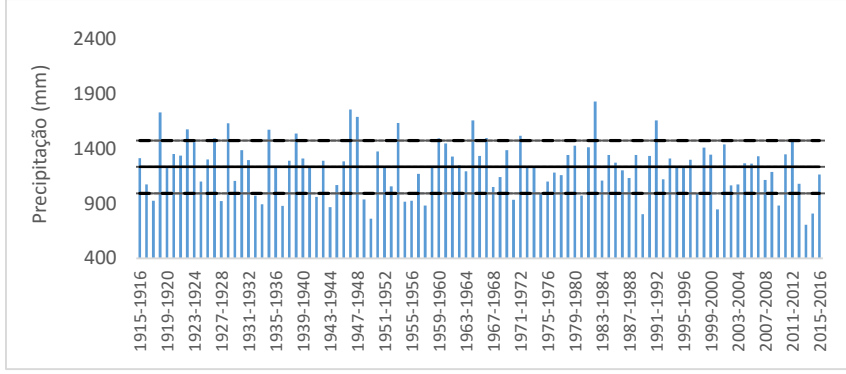
$x > \frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$. Se $\varepsilon > 0$, GEV representa uma distribuição de máximos se $x < \frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$. Seu ajuste foi conduzido com base no método dos momentos (NAGHETTINI, 2017).

Após a aplicação desta FDP, o procedimento para cálculo do SPEI é o mesmo do SPI. Vicente-Serrano et al. (2009) não apontam uma classificação específica para o SPEI, mas compara os resultados aos SPI. Dessa maneira, adotou-se os mesmos intervalos e a mesma classificação segundo os critérios do NOAA para o SPI.

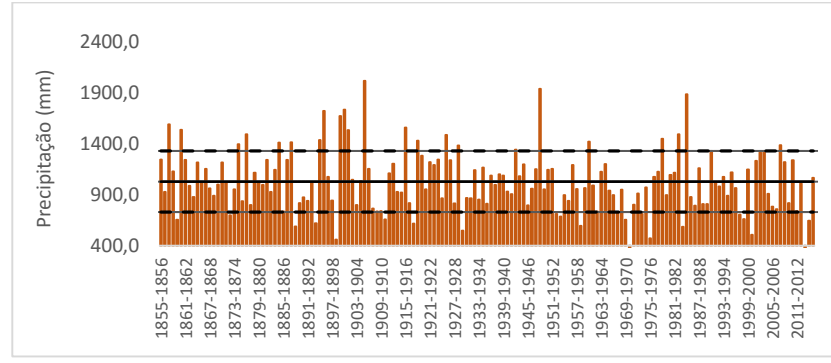
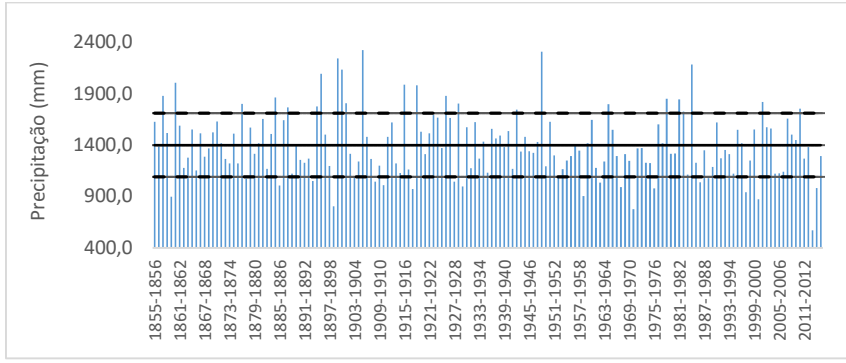
3. Resultados e discussão

3.1. Comportamento da precipitação

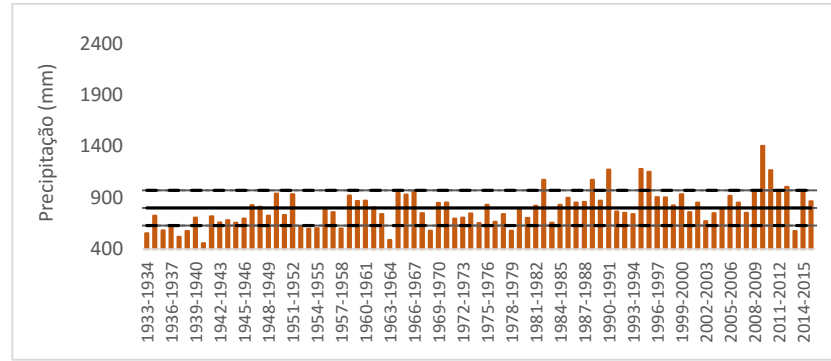
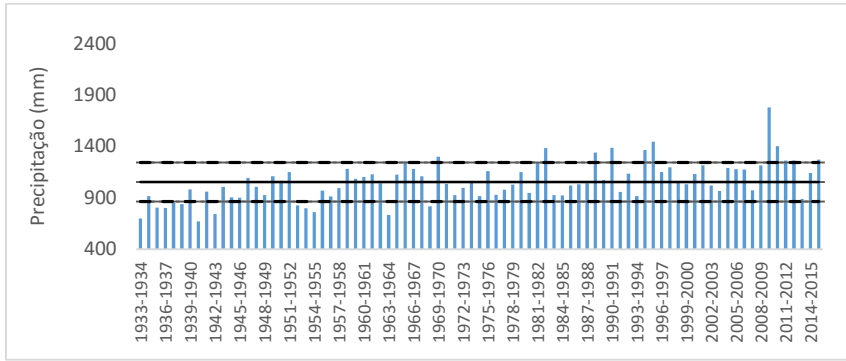
Na Figura 2 estão apresentados os comportamentos temporais da precipitação para o período chuvoso (P6) e verão (P4) para as séries estudadas (a. sul de MG; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste SP; e. RM-Campinas). Para o sul de Minas Gerais, o período P6 apresentou média de $1234,5 \pm 240,6$ mm, e para o P4, $911,8 \pm 210$ mm. O teste de Mann-Kendall demonstrou que ambas as séries não apresentaram tendência temporal significativa. Para o ano hidrológico 2013/2014 foram registrados os menores valores de precipitação desde o início das medições em 1915. O período chuvoso deste ano hidrológico acumulou 706 mm, o que correspondeu a 57,2% da média registrada neste período (1234,5 mm). Destacam-se ainda os anos hidrológicos 1949/1950 (762,4 mm), 1989/1990 (803,1 mm) e 2000/2001 (848,9 mm) que apresentaram valores que não atingiram 65% da média. Historicamente, durante o verão espera-se a ocorrência de 75% do total precipitado para o período P6 na região sul de Minas Gerais. No entanto, para o ano hidrológico 2013/2014, foram registrados 447,3 mm para o período P4, o que correspondeu a 49% da média deste (911,8 mm) e 63,3% do registrado no respectivo período P6 (706 mm). Esses dados demonstram o comportamento anômalo do regime de precipitação nesse ano hidrológico no sul de Minas Gerais.



a)

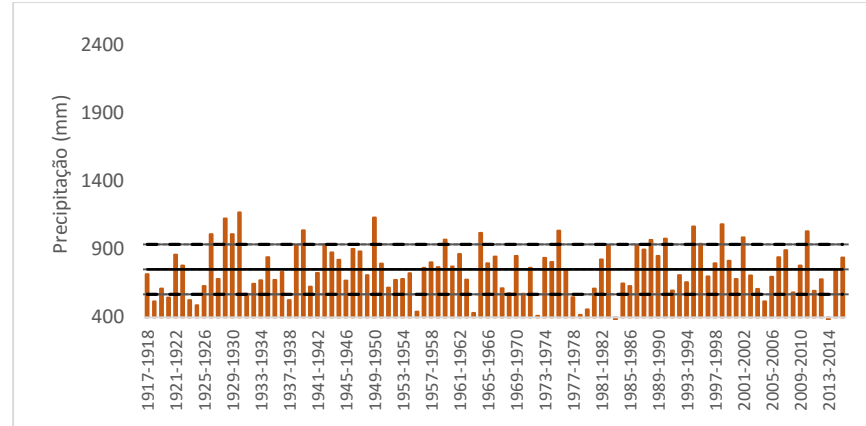
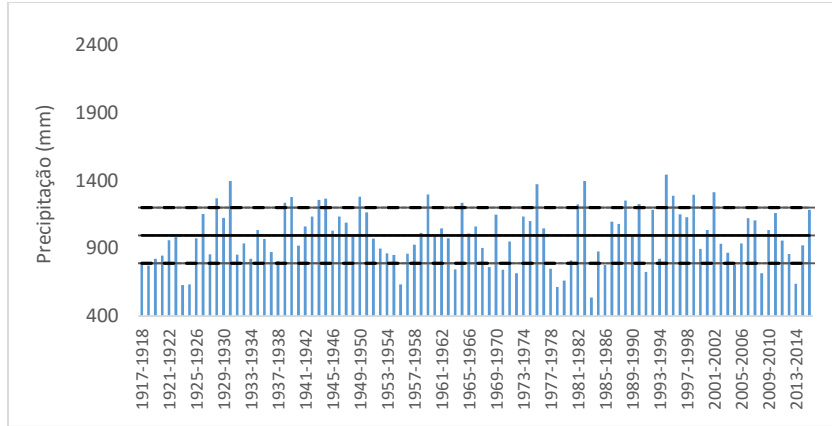


b)



c)

d)



e)

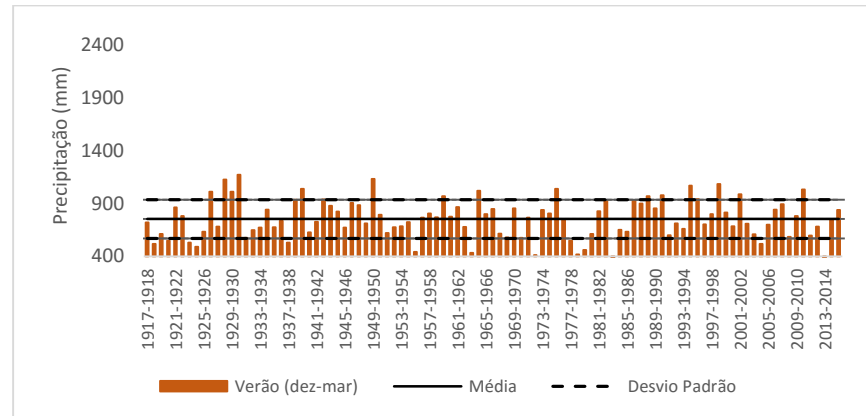
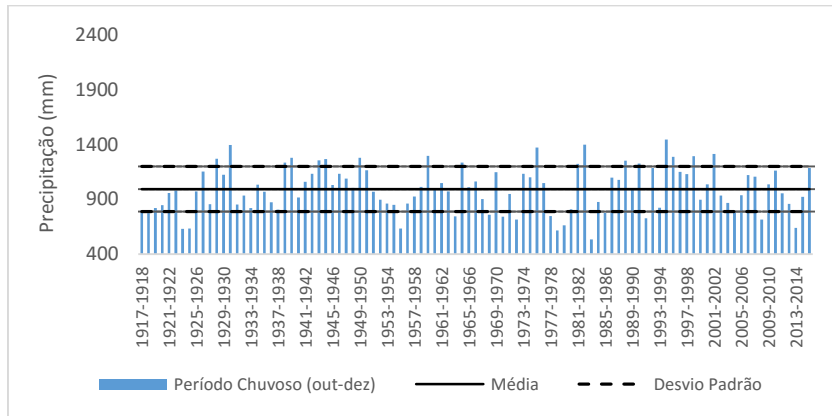


Figura 2. Comportamento histórico da precipitação para os períodos P6 e P4 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas).

Para a RM-BH (Figura 2b), espera-se que o total precipitado no período P4 (verão) corresponda a 73% do período P6. Para este último, a média é de 1400 ± 308 mm, enquanto para primeiro, 1030 ± 300 mm. O teste Mann-Kendall não demonstrou tendência significativa para essas séries. Para os 151 anos de observação pluviométrica, o período P6 com o menor total registrado foi o ano hidrológico 2013/2014, com 571 mm, o que corresponde a 40% da média histórica. Destacam-se ainda como anos com baixos valores de precipitação 1898/1899 (802 mm), e 1970/1971 (775 mm). O período P4 do ano hidrológico 2013/2014 também apresentou o menor registro de precipitação nesses 151 anos, apenas 300 mm, ou 33% da média histórica de P4, e 52,5% do total registrado para o período P6. Para o vP4, merecem destaque os anos de 1898/1899 (461,6 mm) e 1975/1976 (474,6 mm).

Para a RM-SP observou-se média de 1053 ± 190 mm para o período P6 e 799 ± 171 mm para o período P4, correspondendo a 75,9% do período P6. Na Figura 2c é possível observar o comportamento dessas séries de precipitação, as quais, com base no teste Mann-Kendall, apresentam um crescimento significativo em ambas as séries, a uma taxa de $4,40 \text{ mm.ano}^{-1}$ e $3,45 \text{ mm.ano}^{-1}$, respectivamente, para o período P6 e P4. Uma análise das normais climatológicas para a cidade de São Paulo no período de 1981 a 2010, mostrou que houve aumento da precipitação total anual (12%) bem como para alguns meses do período chuvoso, tais como Janeiro (21,4%), Março (33,6%) e Dezembro (11,8%), reforçando o comportamento detectado pelo teste de Mann-Kendall. A tendência de crescimento da precipitação também foi encontrada por Raimundo et al. (2014), que analisaram séries de precipitação da RM-SP e verificaram que 9 das 21 estações analisadas apresentaram tendência positiva significativa no verão (DJF), com taxas entre $2,18 \text{ mm trim}^{-1}$ até $5,04 \text{ mm trim}^{-1}$.

Ainda com base na Figura 2c, os menores registros de precipitação no período P6 estão concentrados entre 1933 e 1945 e que o menor valor ocorreu no ano hidrológico 1933/1934 (555,8 mm), o que correspondeu a 52,8% da média histórica (1053 mm). Merecem destaque os anos hidrológicos 1940/1941 (670 mm), 1963/1964 (730,7 mm), 1933/1934 (555,8 mm) e 2013/2014 (576,4 mm) que também registraram valores abaixo da média. Para o período P4, destaca-se também o período entre 1933 e 1945, o qual concentrou a maioria dos registros de precipitação abaixo da média. O menor valor registrado para um verão ocorreu em 1940/1941 (459 mm), o que corresponde a 57% do

valor médio para o período (799 mm), e a 68,2% do registrado para o respectivo período P6.

A região centro-leste do estado de São Paulo (Piracicaba) apresentou média no período P6 igual a 994 ± 205 mm, e o para o P4, 752 ± 183 mm (75,6% do total esperado para o período P6). A Figura 2d apresenta o comportamento temporal dessas séries históricas, sendo que o teste Mann-Kendall não detectou tendência significativa para ambas as séries. Observa-se que o ano hidrológico 1983/1984 foi o que apresentou o menor valor de precipitação para o período P6 (536 mm; 54% da média histórica). É importante destacar ainda os anos 2013/2014 (639 mm; 64% da média histórica), 1978/1979 (615 mm; 62% da média histórica), 1955/1956 (635 mm; 64% da média histórica) e 1924/1925 (610 mm; 65% da média histórica), que também apresentaram valores abaixo da média.

Para o período P4, o ano hidrológico 1983/1984 também apresentou o menor registro de precipitação da série histórica (318 mm), correspondendo a 42% da média histórica para P4. Para o citado ano hidrológico, o total precipitado no verão correspondeu a 59,3% do total registrado no período P6, ou seja, um valor muito abaixo do percentual esperado, de 75,6%. Destacam-se como anos cujos períodos P4 apresentaram precipitações abaixo da média: 2013/2014 (374 mm; 50% da média histórica, 1978/1979 (415 mm; 56% da média histórica), 1972/1973 (411 mm; 72% da média histórica), 1963/1964 (420 mm; 58% da média histórica) e 1955/1956 (412 mm; 59% da média histórica).

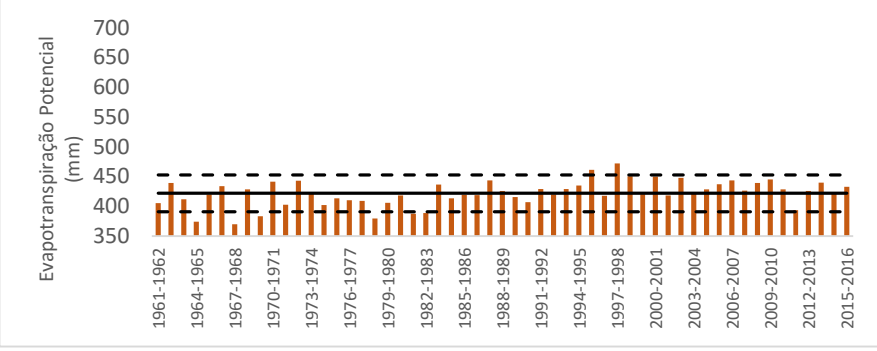
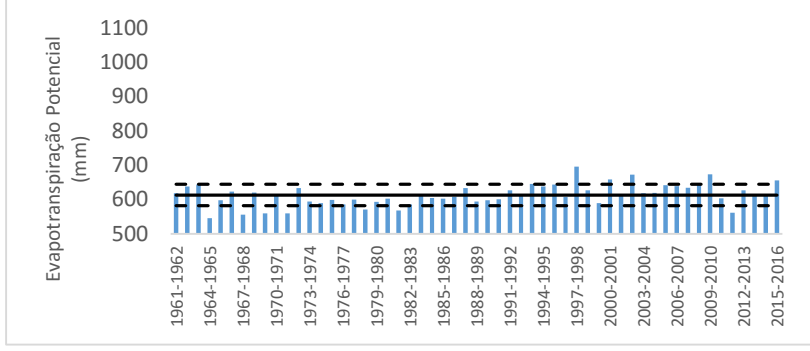
A RM-Campinas apresenta média para o período P6 igual a 1086 ± 217 mm e para o P4, 820 ± 202 mm, o que corresponde a 75,5% do total relativo ao período P6. Na Figura 2e apresentam-se os comportamentos temporais das séries de precipitação para P6 e P4, sendo que o teste de Mann-Kendall não detectou tendência temporal nessas séries históricas. Observou-se que o ano hidrológico 2013/2014 foi o que apresentou o menor registro de precipitação para o período P6 (556 mm), o que representa 51% do valor médio. Destacam-se como anos com totais abaixo da média: 1924/1925 (775 mm; 72% da média histórica), 1968/1969 (703 mm; 65% da média histórica) e 1977/1978 (712 mm; 66% da média histórica).

O menor valor registrado para P4 na RM-Campinas também foi observado durante o ano hidrológico 2013/2014 (392 mm, 47,8% da média esperada) e 70,5% do total

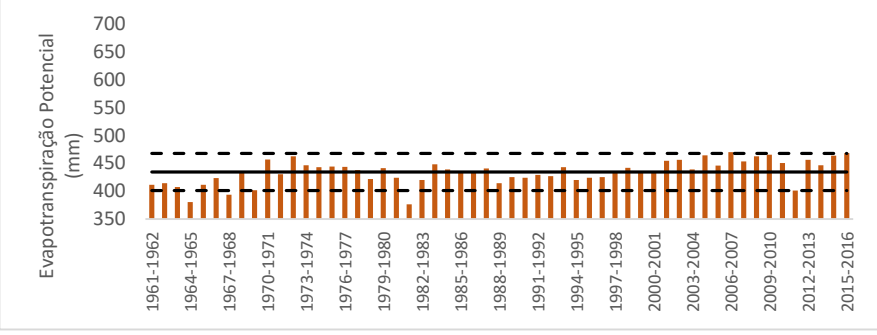
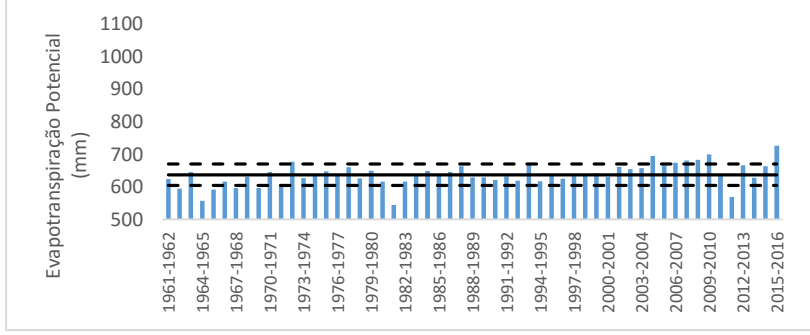
precipitado no respectivo período chuvoso (556 mm). Os anos de 1907/1908 (483 mm; 59% da media histórica), 1937/1938 (465 mm; 57% da média histórica), 1983/1984 (529,1; 71% da média histórica) e 1991/1992 (529,1 mm; 65% da média histórica) também se destacam com totais precipitados de verão muito abaixo da média.

3.2. Comportamento da evapotranspiração

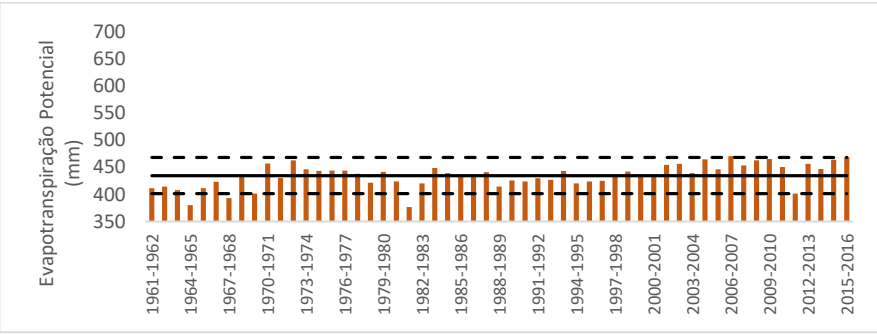
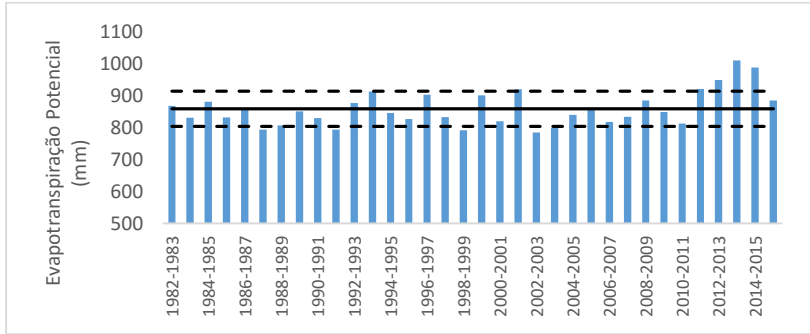
Na Figura 3 estão apresentados os comportamentos da evapotranspiração potencial para as regiões do Sudeste do Brasil em estudo, conforme extensão da série histórica apresentada na Tabela 1.



a)



b)



c)

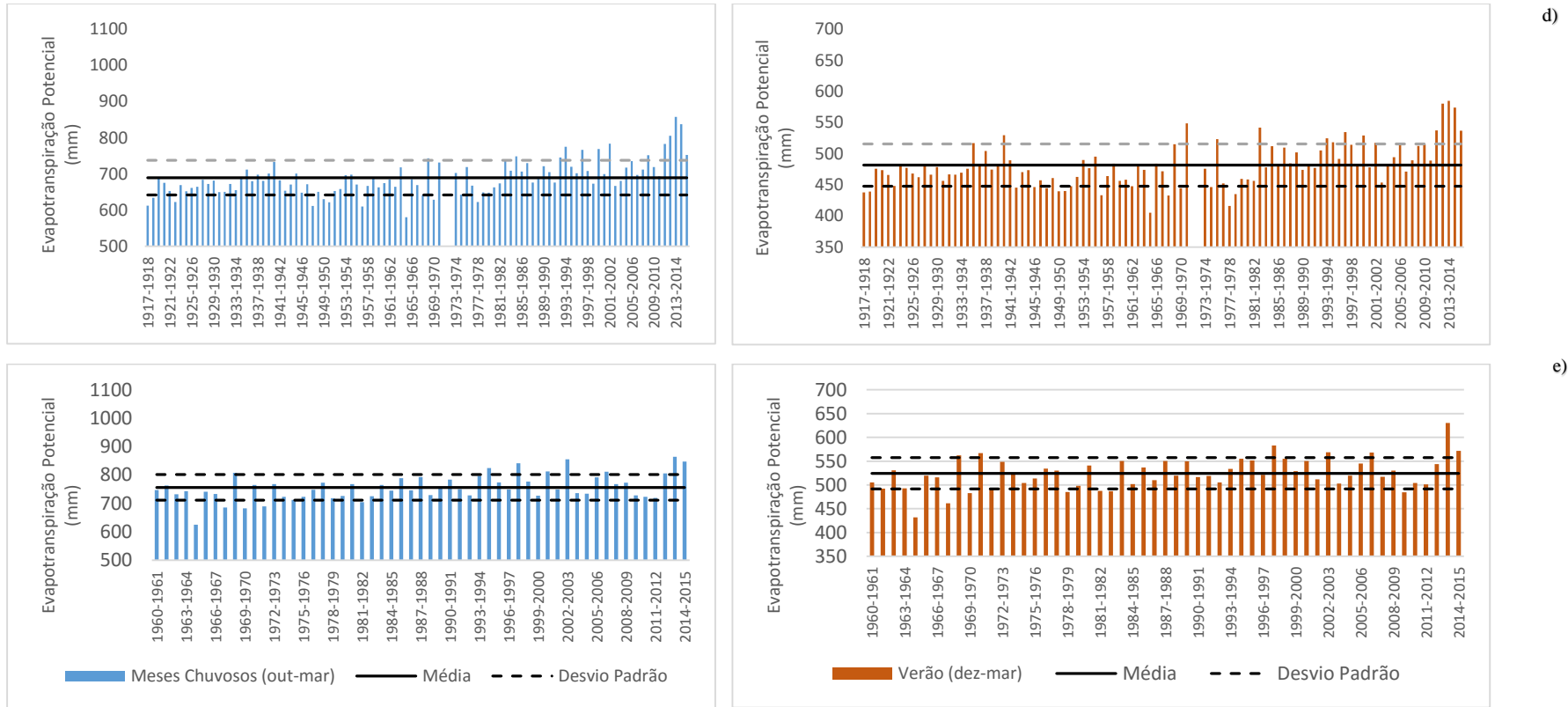


Figura 3. Comportamento da evapotranspiração potencial para os períodos P6 e P4 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas).

A evapotranspiração potencial (ETp) estimada por Thornthwaite para a região sul de Minas Gerais (Lavras) (Figura 3a) apresentou média de $613,4 \pm 31$ mm para o período P6, enquanto que para o P4, foi de $422 \pm 21,2$ mm. Diferentemente da precipitação, o teste de Mann-Kendall demonstrou que há tendência significativa e positiva nessas séries de ETp, significando aumento da temperatura ao longo do período de observação, conforme também observado por Ávila et al. (2014). Foi detectado um crescimento de $0,86$ mm semestre⁻¹ para o período P6 e $0,54$ mm quadrimestre⁻¹ para o período P4.

Para a RM-BH, a ETp no período P6 (Figura 3b) apresentou média de 637 ± 34 mm, enquanto para o verão, $434 \pm 21,3$ mm. A análise temporal dessas séries mostrou que há tendência positiva de crescimento da evapotranspiração, a taxas superiores às observadas para a região sul de Minas Gerais (Ávila et al. 2014; Minuzzi et al. 2010), sendo de $1,1$ mm semestre⁻¹ para P6 e de $0,75$ mm quadrimestre⁻¹ para P4.

A ETp média para a RM-SP é maior do que o que foi observado para as regiões estudadas no estado de Minas Gerais, sendo 859 ± 55 mm no período P6 e 599 ± 38 mm para o P4. A análise de tendência temporal (Figura 3c) com base no teste de Mann-Kendall, mostrou que as séries de P6 e P4 apresentaram tendência positiva de crescimento consideravelmente superior ao observado para as regiões de Minas Gerais, com taxas de $1,78$ mm.semestre⁻¹ e $1,60$ mm.quadrimestre⁻¹, respectivamente. Blain (2010) e Vincent et al (2005) encontram tendências positivas de temperatura para a cidade de São Paulo, observando um aumento de até 10% no número de dias com temperatura média maior que 25°C. É importante destacar na Figura 3c que os valores de ETp atingiram os valores máximos da série entre 2013 e 2015.

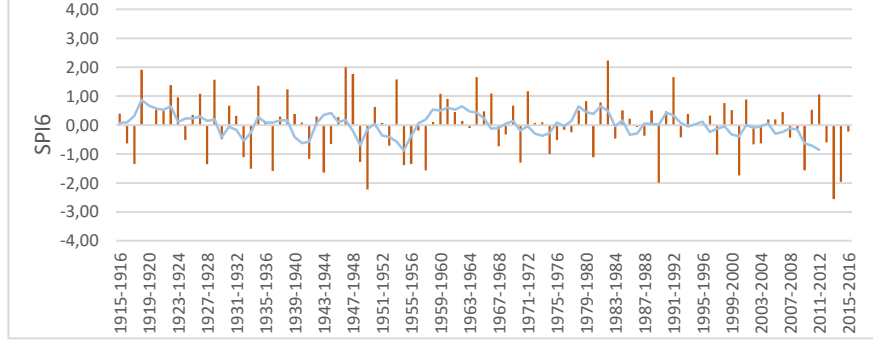
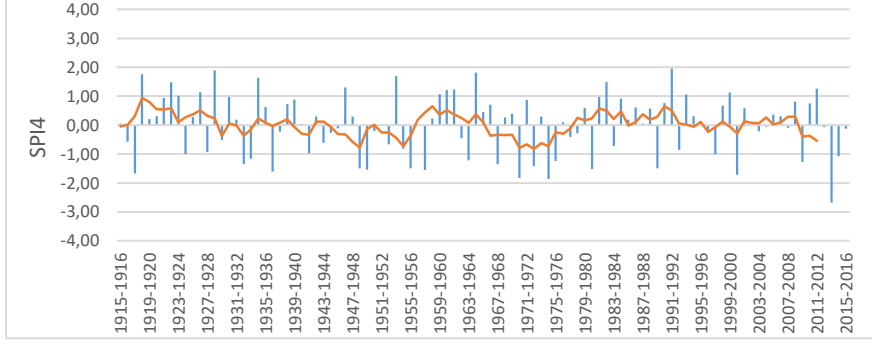
Para a região centro-leste do estado de São Paulo (Piracicaba), o período P6 (Figura 3d) apresenta média de ETp igual a $689,7 \pm 48$ mm, e para P4, 481 ± 34 mm. Contudo, o teste de Mann-Kendall não demonstrou tendência positiva de crescimento da ETp nas séries analisadas, diferentemente das demais regiões estudadas.

Para a RM-Campinas, a média de ETp no período P6 foi de 756 ± 45 mm, enquanto para P4, 525 ± 33 mm. Na Figura 3e é possível observar o comportamento temporal dessas séries para as quais o teste de Mann-Kendall demonstrou que há tendência positiva de crescimento, com taxas, respectivamente, de $1,27$ mm.semestre⁻¹ e $0,77$ mm.quadrimestre⁻¹.

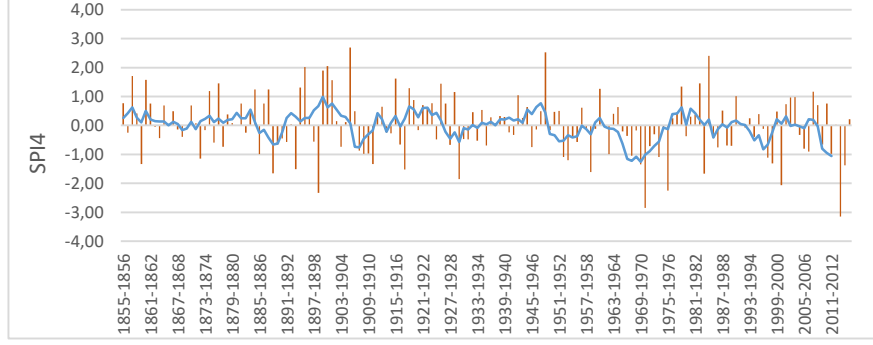
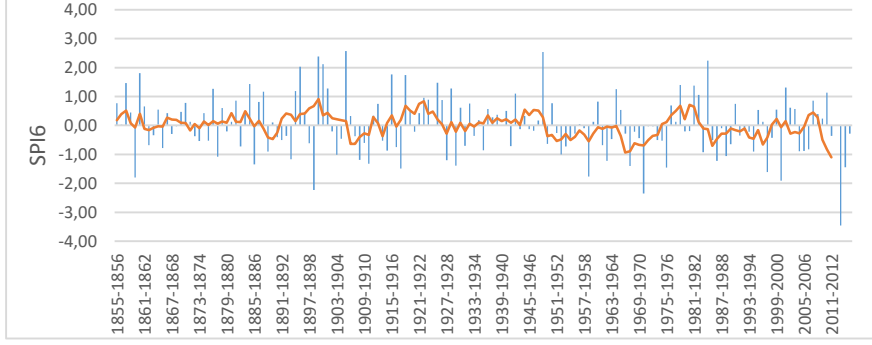
A região centro-leste do estado de São Paulo foi a única que não apresentou tendência positiva na evapotranspiração potencial. A série histórica de temperatura mensal de 99 anos, diferente das demais regiões estudadas (55), pode ter mascarado o efeito do crescimento da temperatura após a década de 60, como observado nas regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas. A região Sul de Minas Gerais apresentou os menores valores de evapotranspiração potencial, enquanto a RM-São Paulo apresentou os maiores valores evapotranspiração.

3.3. Comportamento do Standard Precipitation Index (SPI)

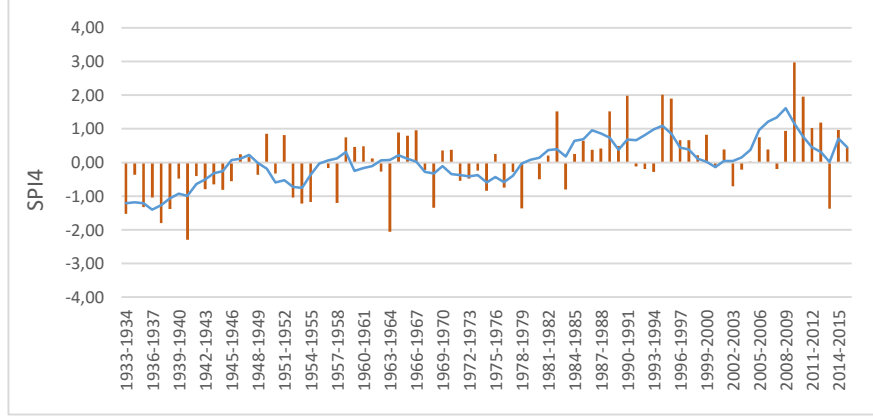
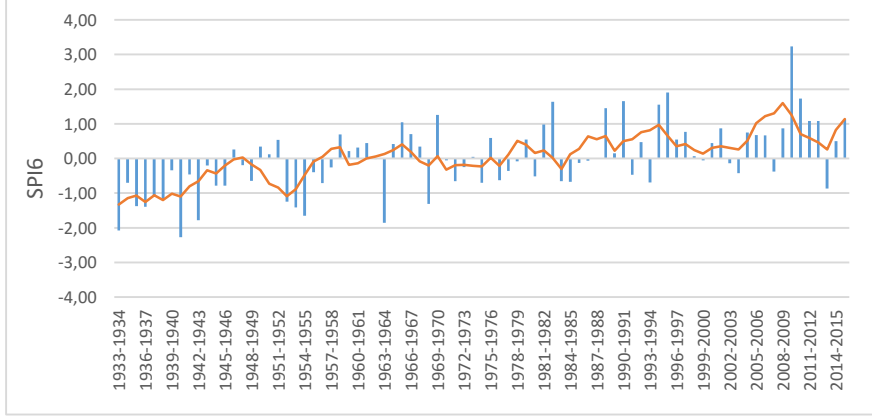
Na Figura 4 estão apresentados os comportamentos temporais do SPI para as diferentes regiões estudadas do Sudeste do Brasil. A região sul de Minas Gerais (Figura 4a) é estratégica para a geração de energia hidrelétrica para o sistema interligado do país, sendo Furnas o principal aproveitamento do Sudeste do Brasil. Uma sequência de SPI negativos indica um período de seca prolongado, visualizado pela presença de médias móveis de 5 anos. A Figura 4a apresenta a distribuição temporal do SPI referente ao período P6 (SPI6) e ao P4 (SPI4). A ausência de tendência na série histórica de precipitação é um indicativo de que o SPI alterna seus valores ao redor de zero, indicando anos mais secos com anos mais úmidos. Observa-se que o ano 2013-2014 foi o mais seco já registrado com base tanto no SPI nos últimos 102 anos para a região sul de Minas Gerais. Seu impacto pode ter sido ainda maior uma vez que esse evento foi precedido de um ano “anormalmente seco” e seguido por um “severamente seco”. Essa sequência de eventos anômalos de seca afetou diretamente a umidade do solo, a recarga de aquíferos e a manutenção dos cursos d’água, sendo que muitos ainda não se recuperaram totalmente desse efeito. Com base na média móvel de 5 anos, observa-se que o SPI4 apresentou valores menores do que o SPI6. Isso indica uma proporção entre o volume precipitado no período P4 (verão) e no período P6 (chuvoso) inferior a 75% durante os episódios de seca mais severas. Especificamente no ano hidrológico 2013/2014, essa relação foi de 63,3%.



a)



b)



c)

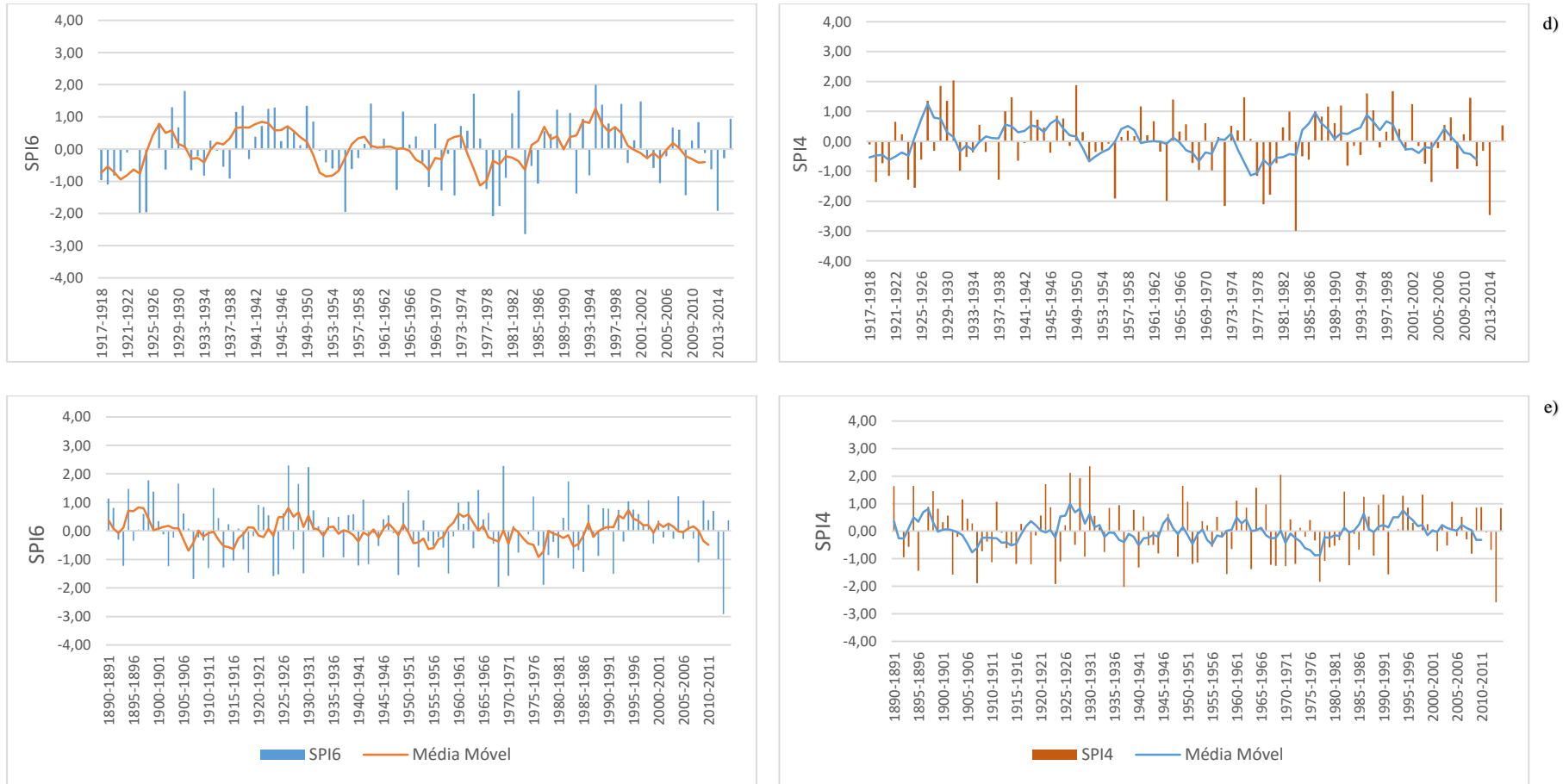


Figura 4. Comportamento histórico do SPI referente aos períodos P6 e P4 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas).

Analisando a série histórica de SPI6 da Figura 4a, é possível verificar que houve somente 2 eventos considerados “excepcionalmente secos” ao longo dos 102 anos de dados observados, correspondentes aos anos hidrológicos de 1949/1950 (-2,22) e 2013/2014 (-2,55). Foi observado também que eventos considerados “muito secos” aconteceram em média uma vez a cada 12,5 anos, e “severamente secos” a cada 25 anos. O SPI6 demonstra uma frequência maior de secas consideradas mais intensas para a região sul de Minas Gerais do que o SPI4, com eventos “extremamente secos” podendo ocorrer uma vez a cada 50 anos, enquanto “moderadamente secos” ocorreram 7 vezes a cada 50 anos.

Para a RM-BH, o comportamento do SPI6 e SPI4 estão apresentados na Figura 4b, tendo-se como base os dados registrados no posto pluviométrico de Nova Lima (151 anos). Baseando-se no SPI6, ao longo desses 151 anos, três eventos “excepcionalmente secos” foram observados no período P6, sendo que o primeiro foi observado em 1898/1899 (-2,33), o segundo em 1970/1971 (-2,84) e o último e mais intenso, com SPI de -3.45, em 2013/2014. Assim como observado para o sul de Minas Gerais, nas décadas de 1950 e 1960 foram registrados vários valores negativos de SPI6, caracterizando-se também um período extenso e seco na região.

Analisando-se ainda a Figura 4b, observa-se que o ano 2000/2001 apresentou SPI6 de -1,90, valor considerado “severamente seco”. Neste ano, o país sofreu com o “Apagão” do Sistema Elétrico Nacional, levando à necessidade de racionamento de energia principalmente na região Sudeste. Com base nos dados de SPI4, observou-se que estes seguem um comportamento parecido ao do SPI6, porém, com o registro de 5 eventos “extremamente secos” em 151 anos. Entretanto, 4 desses 5 eventos aconteceram a partir da década de 1970, o que pode ser um indício de que esses vem ocorrendo com mais frequência recentemente. Em termos climatológicos, Cavalcanti e Kousky (2001) explicam que essa estiagem foi causada por vórtices ciclônicos de altos níveis, que atuaram com maior frequência e de forma anômala no interior do Brasil, bloqueando a passagem de frentes frias e da formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Na RM-SP, observou-se comportamento diferente do SPI em relação ao que foi observado para as regiões em estudo de Minas Gerais. O comportamento do SPI6 (Figura 4c) indica que devido à tendência de aumento da precipitação, conforme apresentado anteriormente e também obtido em outros estudos, a maior frequência de ocorrência de eventos de seca foi detectada nas décadas de 1940 e 1950. Foram registrados eventos

“extremamente secos” 2 vezes em 83 anos, enquanto eventos “severamente secos” aconteceram 3 vezes nesse período. Observou-se ainda que eventos “severamente secos” demonstraram uma frequência reduzida de ocorrência, o que levou a uma diminuição da severidade das secas (Figura 4c). O ano hidrológico 1940/1941 apresentou o SPI6 mais baixo já registrado, com um valor de -2,30. Coelho et al. (2016) analisaram os eventos de seca utilizando SPI4 e SPI6 a partir de 1961 para a região do sistema Cantareira e verificaram que 2013/2014 foi ano mais seco observado em seu estudo. Os autores encontraram um SPI4 de -3,66 e um SPI6 de -2,70 para esse ano hidrológico, os quais são consideravelmente diferentes dos valores de -1,37 e -0,87, respectivamente, encontrados no presente estudo. Outra diferença detectada está na quantidade de eventos secos que precederam e que se seguiram ao ano hidrológico de 2013/2014. Coelho et al. (2016) observaram que o período chuvoso dos anos hidrológicos de 2011/2012 a 2013/2014 apresentam valores de SPI6 e SPI4 muito baixos, justificando-se o baixo volume do reservatório Cantareira. Uma observação importante sobre as diferenças constatadas é de que Coelho et al. (2016) estudaram a região de drenagem para o reservatório Cantareira, a qual consiste de uma contribuição hidrológica e climática oriunda da bacia do rio Grande e nessa bacia, o período entre 2012 e 2015 foi de fato o mais seco observado, conforme os valores do SPI6 e SPI4 para a região sul de Minas Gerais.

De forma semelhante à RM-SP, a região centro-leste do estado (Piracicaba) não apresentou o período P6 do ano hidrológico 2013/2014 como o mais seco já registrado com base nos indicadores SPI. O ano 1983/1984 apresentou SPI6 (Figura 4d) de -2,64, enquanto 2013/2014, -1,92. É importante notar que foram registrados 5 eventos “severamente secos” e 2 “excepcionalmente secos” com base no SPI6 ao longo dos 98 anos de dados. Observa-se que o ano hidrológico de 2013/2014 foi precedido de 1 evento “anormalmente seco” e outro normal (SPI6, respectivamente, igual a -0,63 e -0,12), ou seja, um comportamento distinto do que foi observado na região sul de Minas Gerais e RM-BH. Vicente-Serrano et al. (2009) utilizaram a metodologia do SPI12 (12 meses) para analisar episódios de seca na cidade de São Paulo entre 1910 e 2010. Os autores verificaram uma tendência de crescimento da precipitação com o passar do tempo e uma concentração de valores negativos de SPI12 priori a década 1970, como encontrado no presente trabalho.

Analisando o comportamento do SPI4, observou-se que os eventos “excepcionalmente secos” foram observados 4 vezes, sendo que o verão mais seco já

registrado foi o de 1983/1984, com SPI4 igual a -3,0. Nessa região, a precipitação do período P4 do ano 1983/1984 correspondeu a apenas 59,3% do observado no respectivo período P6, muito inferior ao valor médio de 75,6%. Merece destaque ainda que o evento 2013/2014 foi enquadrado como “excepcionalmente seco”, com SPI4 de -2,46.

O ano hidrológico 2013/2014 apresentou o período P6 mais seco já observado na RM-Campinas (Figura 4e), com SPI6 igual a -2,92, sendo o único evento “excepcionalmente seco” observado em 126 anos. Observa-se, entretanto, que há ocorrência de 11 eventos “muito secos” e 14 “moderadamente secos”, o que indica que eventos de seca são comuns e recorrentes nessa região. Com base no SPI4, verifica-se a ocorrência de dois eventos “excepcionalmente secos” (Figura 4e), correspondendo aos períodos P4 dos anos hidrológicos 2013/2014 (-2,60) e 1937/1938 (-2,01). Em comparação com os dados de SPI6, observa-se uma menor ocorrência de eventos “muito secos”, porém, foram observados 18 eventos “moderadamente secos”.

Na Tabela 2 apresenta-se a frequência de ocorrência de secas com base no SPI6 e SPI4, considerando-se o mesmo intervalo de tempo para todas as regiões (1933-2016), permitindo uma comparação das frequências entre estas. Observa-se que a quantidade de eventos de seca SPI6 foi semelhante entre as regiões, no entanto, quando se analisa os eventos “excepcionalmente secos”, a RM-Campinas foi afetada por apenas 1 evento, enquanto que nas demais foram observados 2 eventos.

Uma variação maior da quantidade total de eventos de seca foi observada entre 1933 e 2016 para SPI4. A RM-Campinas foi a que apresentou a maior quantidade de eventos (29), enquanto a região centro-leste de São Paulo, a menor quantidade (21). Observa-se, no entanto, que nesta última, foram observados 4 eventos “excepcionalmente secos”, de forma semelhante à RM-BH. A região sul de Minas Gerais apresentou somente 1 evento “excepcionalmente seco”, porém, 4 eventos “severamente secos”.

Pela Figura 5a (SPI6) e 5b (SPI4), observa-se que eventos anômalos de secas não aconteceram de forma isolada no Sudeste, sendo que sempre que um desse natureza foi observado, em todas as outras algum evento anômalo foi registrado. A exceção, porém, encontra-se no ano hidrológico 2013/2014, no qual 3 das 5 regiões (Sul de Minas, RM-BH e RM-Campinas), apresentaram eventos “excepcionalmente secos”. Esse figura deixa clara a ocorrência marcante da condição de seca extrema na região Sudeste do Brasil no ano hidrológico 2013/2014.

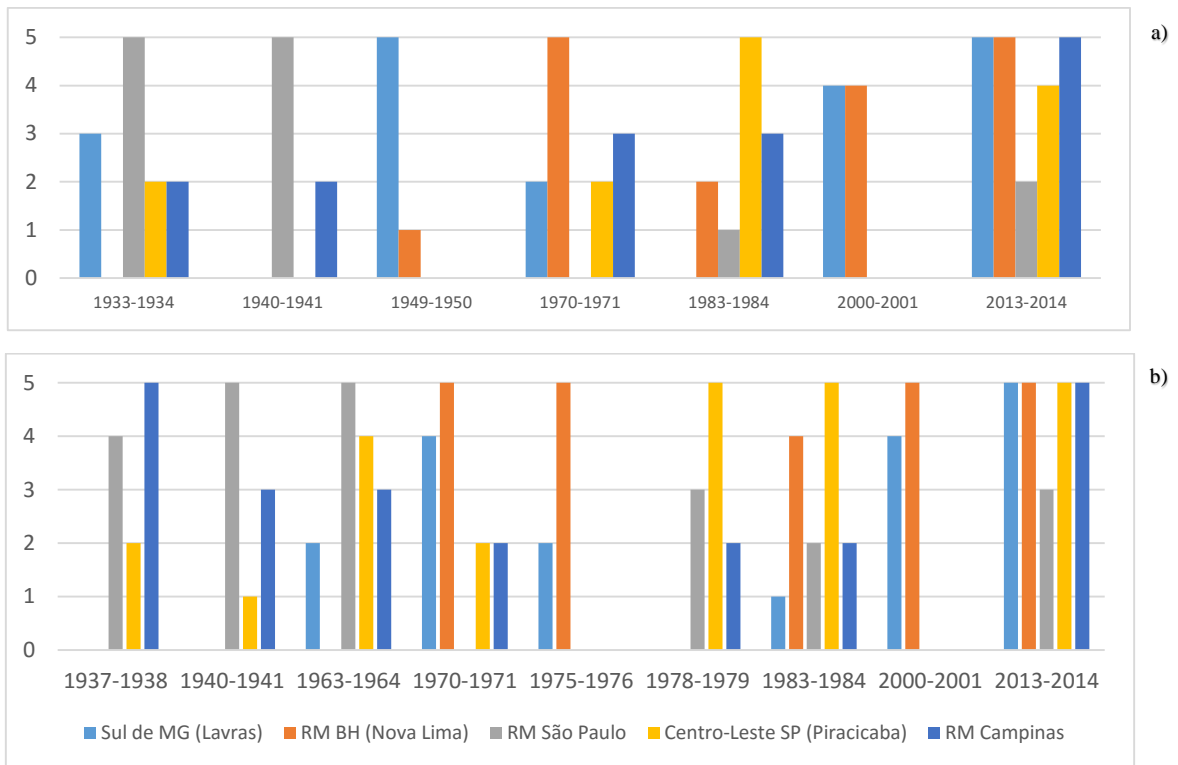


Figura 5. Anos “excepcionalmente secos” e a ocorrência de eventos de seca nas regiões estudadas (a. com base no SPI6; b. com base no SPI4; 5= excepcionalmente seco, 4= severamente seco, 3= muito seco, 2= moderadamente seco, 1= anormalmente seco).

Tabela 2. Frequência de ocorrência de eventos de seca observados de 1933-2016 para as regiões do centro-sul do Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4.

NOAA (classificação)	Sul de MG (Lavras) – SPI6	Sul de MG (Lavras) – SPI4	RM Belo Horizonte (Nova Lima) SPI6	RM Belo Horizonte (Nova Lima) SPI4	RM São Paulo (São Paulo IAG) SPI6	RM São Paulo (São Paulo IAG) SPI4	Região Centro-Leste SP (Piracicaba) SPI6	Região Centro- Leste SP (Piracicaba) SPI4	RM Campinas (IAC) SPI6	RM Campinas (IAC) SPI4
Anormalmente Seco	6 1 evento/17 anos	3 1 evento/34 anos	6 1 evento/27 anos	10 1 evento/16 anos	12 1 evento/7 anos	6 1 evento/14 anos	7 1 evento/14 anos	6 1 evento/16 anos	7 1 evento/18 anos	10 1 evento/13 anos
Moderadamente Seco	6 1 evento/17 anos	9 1 evento/11 anos	10 1 evento/16 anos	8 1 evento/20 anos	4 1 evento/21 anos	8 1 evento/10 anos	10 1 evento/10 anos	7 1 evento/14 anos	10 1 evento/13 anos	10 1 evento/13 anos
Muito Seco	6 1 evento/17 anos	8 1 evento/13 anos	3 1 evento/54 anos	3 1 evento/54 anos	4 1 evento/21 anos	6 1 evento/14 anos	3 1 evento/32 anos	1 1 evento/98 anos	6 1 evento/21 anos	4 1 evento/32 anos
Severamente Seco	4 1 evento/25 anos	4 1 evento/25 anos	3 1 evento/54 anos	2 1 evento/80 anos	3 1 evento/28 anos	1 1 evento/83 anos	3 1 evento/32 anos	3 1 evento/32 anos	2 1 evento/63 anos	1 1 evento/126 anos
Excepcionalmente Seco	2 1 evento/51 anos	1 1 evento/101 anos	2 1 evento/81 anos	4 1 evento/40 anos	2 1 evento/42 anos	2 1 evento/42 anos	2 1 evento/49 anos	4 1 evento/25 anos	1 1 evento/126 anos	2 1 evento/63 anos
Total	24	25	24	27	25	23	25	21	26	29

O ano hidrológico 2013/2014, que foi afetado pela seca climatológica anômala mais importante já registrada no Sudeste do Brasil com base no SPI, pode ser explicado por alguns comportamentos atmosféricos específicos. Marengo (2015) e Nobre et al. (2016) explicam que a causa da escassez nessa região do Brasil foi a presença persistente de um sistema de alta pressão (subsistência) nos níveis baixos e médios da atmosfera. Esse sistema inibiu a formação de chuvas convectivas, típicas dessa época, e, além disso ocorreu uma intensificação anômala do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), bloqueando a passagem de sistemas frontais, bem como a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (corredor de umidade da região Amazônica para o Sudeste). Além de ter sido um ano extremamente seco, 2013/2014 foi precedido e seguido de anos secos. Segundo Nobre et al. (2016), uma redução de 20% a 23% no volume de chuvas sobre um período de três anos consecutivos foi suficiente para provocar uma crise hídrica na região sudeste do Brasil. Contudo, não se pode deixar de mencionar o aumento população e as mudanças nas condições de vida das pessoas em relação ao passado, quando eventos similares ocorreram. O gasto per capita de água, especialmente nas regiões mais ricas, é excessivo, além de vários problemas hidráulicos nas redes distribuidoras das grandes cidades do sudeste, levando a um desperdício excessivamente alto. Por esses motivos, a maioria dos reservatórios da região sudeste, ainda encontram-se em níveis preocupantes, mesmo 4 anos após esse evento extremamente seco.

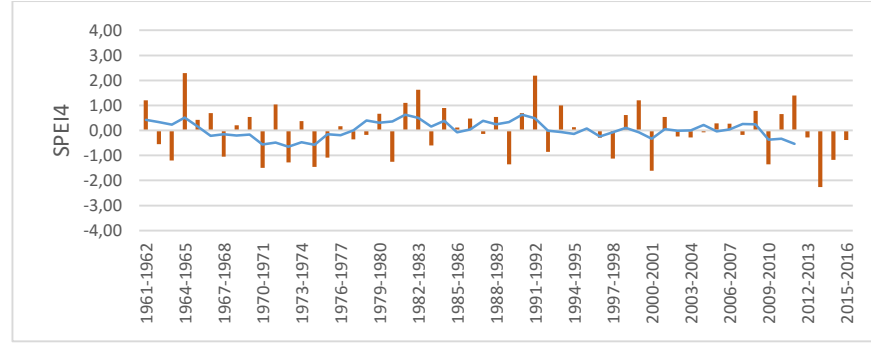
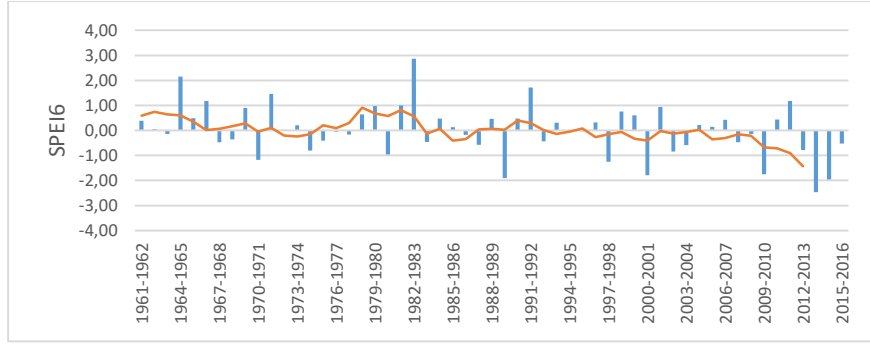
3.4. Comportamento do Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Na Figura 6 estão apresentados os comportamentos temporais do SPEI para as regiões estudadas no Sudeste do Brasil. Para todas estas, o maior valor de ET_p observado ocorreu nos períodos P6 e P4 de 2013/2014. Esses valores influenciaram diretamente o comportamento do SPEI, evidenciando ainda mais o comportamento da seca.

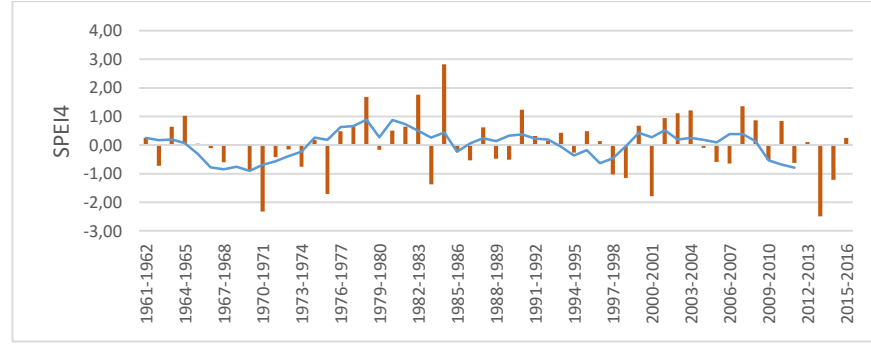
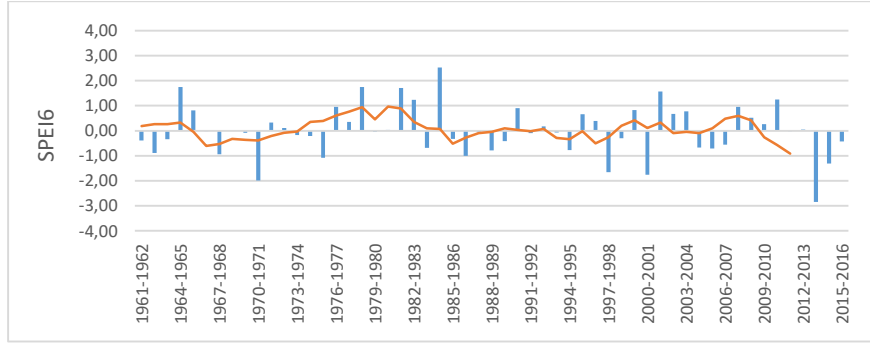
Para a região sul de Minas Gerais (Figura 6a), observou-se que os menores valores de SPEI₆ ocorreram nos anos hidrológicos 2013/2014 e 2014/2015, sendo, respectivamente, iguais a -2,52 e -1,96. Ao se comparar esses resultados aos encontrados para o SPI₆, observa-se que os extremos negativos são coincidentes, reforçando que esses anos hidrológicos foram os mais secos já observados, e que ainda foram precedidos (2012/2013, SPEI₆ = -0,78) e seguidos (2014/2015 e 2015/2016 com SPEI₆ de -1,96 e -0,52, respectivamente) por anos de SPEI₆ negativos. Os valores elevados de

evapotranspiração contribuíram para a aceleração da perda de água para a atmosfera, levando a uma redução da disponibilidade hídrica do solo e maior evaporação direta dos reservatórios de usinas hidrelétricas, impactando diretamente na segurança hídrica da região. Contudo, a aplicação do SPI nesta situação em específico foi suficiente para captar a ocorrência de seca extrema na região.

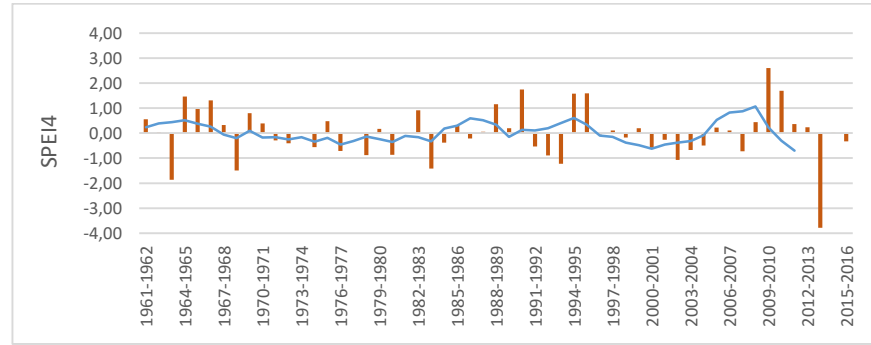
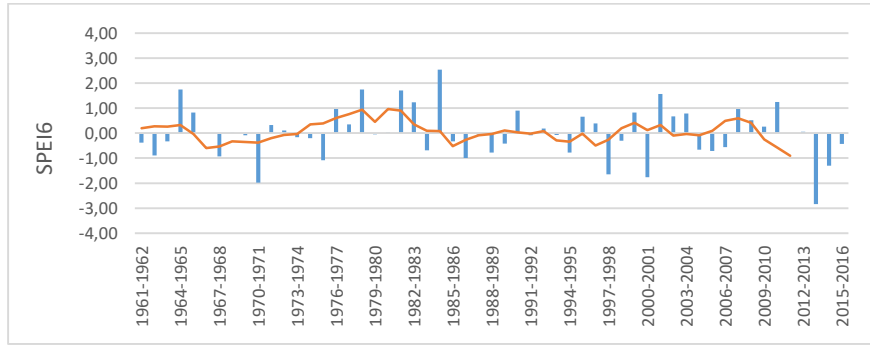
Tomando-se o SPEI4 como referência e sua média móvel de 5 anos, observou-se para a década de 1960 e 1970, que os valores negativos foram mais frequentes. O menor valor de SPEI4 foi registrado para o ano de 2013/2014 (-2,25), indicando que este o ano hidrológico apresentou a maior demanda atmosférica e o menor volume precipitado, sendo, portanto, o verão mais seco já registrado.



a)



b)



c)

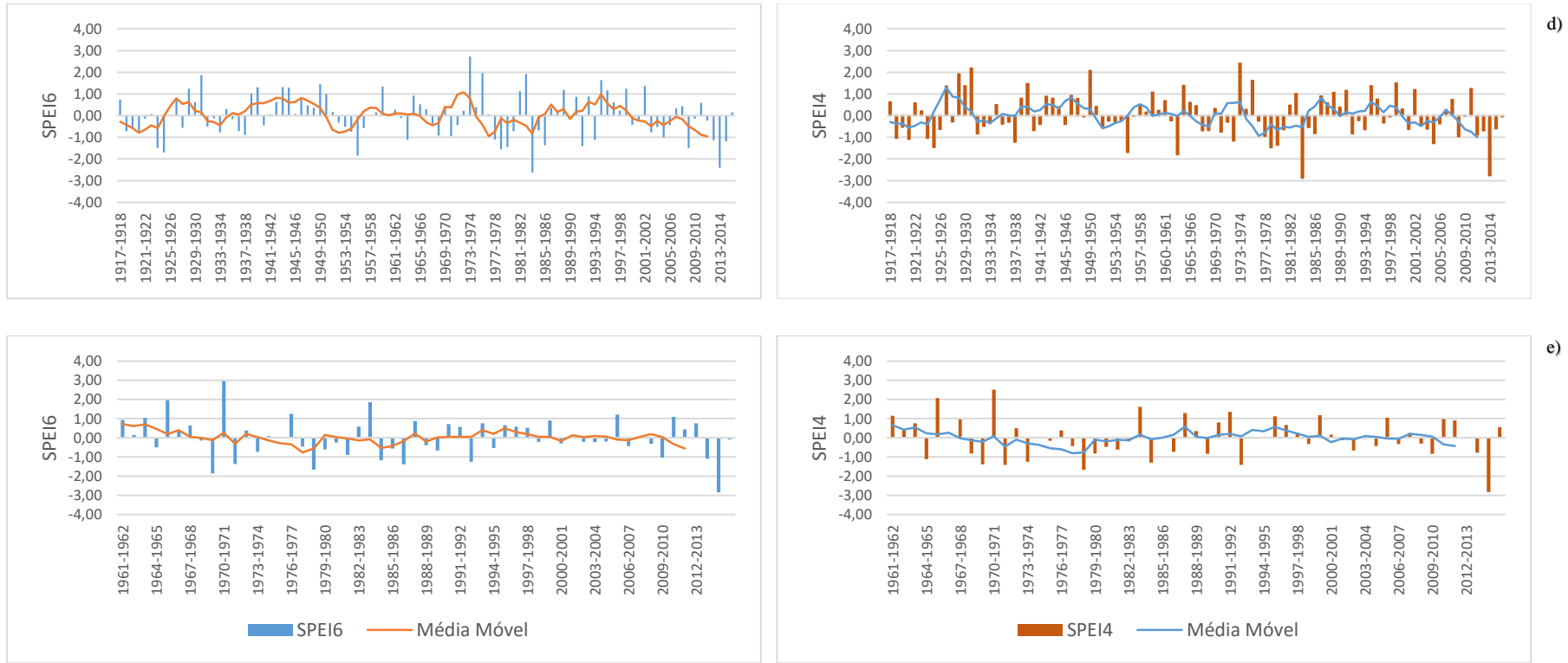


Figura 6. Comportamento histórico do SPEI referente aos períodos P6 e P4 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas).

Na Figura 6b apresentam-se as séries temporais de SPEI6 e SPEI4, entre 1961 e 2016, para a RM-BH. Com base no SPEI6 foi observado um evento “excepcionalmente seco” (2013/2014), com SPEI igual a -2,5. É importante salientar a severidade desse evento, uma vez que para o segundo período P6 mais seco foi observado um SPEI6 igual a -1,98. É importante observar que na sequência ao ano hidrológico 2013/2014, observou-se para 2014/2015, um SPEI6 igual -1,2, ou seja, um período chuvoso “muito seco”. Essa sequência de secas significativas agravou de forma definitiva a crise hídrica na RM-BH.

O SPEI4 no fim da década de 1960 e no começo da década de 1970 consistiu de valores negativos, permitindo caracterizar uma série de verões “muito secos”, com um evento “excepcionalmente seco” em 1970/1971 (-2,32), próximo ao observado em 2013/2014. Foram registrados 2 eventos “excepcionalmente secos” com base no SPEI4, e apenas um com base no SPEI6. Para os eventos “severamente secos”, o SPEI6 apresentou 3 valores, e o SPEI4 2 (Tabela 3).

A aplicação do SPEI permitiu identificar que o ano hidrológico 2013/2014 foi o ano mais seco registrado na RM-SP, diferentemente do que foi encontrado com base nos indicadores SPI. O SPEI6 para o ano hidrológico 2013/2014 foi igual a -2,90 (Figura 6c), especialmente devido ao fato de que a evapotranspiração potencial foi incorporada nessa análise, conforme também considerado por Coelho et al. (2016), Marengo et al. (2015) e Nobre et al. (2016). Foi observado ainda que durante parte das décadas de 1970 e 1980, os valores oscilavam próximos a 0, sem ocorrência de eventos de seca. Foram registrados 2 períodos chuvosos “muito secos”, em 1984/1985 (-1,70) e outro em 1993/1994 (-1,95). O SPEI4 para a RM-SP demonstrou que a seca no ano hidrológico 2013/2014 foi ainda mais severa durante o verão, com valor de -3,7, inferior ao segundo ano mais seco, observado em 1963/1964 (-1,83).

O ano 2013/2014 não foi o mais seco observado para a região centro-leste de São Paulo tendo-se como referência o SPEI6 (Figura 6d), assim como observado com base no SPI. O ano de 1983/1984 apresentou SPEI6 de -2,61, enquanto 2013/2014, -2,41. Além disso, observa-se na Figura 6d que a partir da metade da década de 1970 até a metade da década de 1980 há um período de seca mais persistente, com vários anos apresentando SPEI6 negativos. É importante, ainda, apontar que os dois eventos “excepcionalmente secos” aconteceram nos últimos 40 anos, o que pode indicar que sua frequência de ocorrência pode aumentar no futuro. O SPEI4 para essa região apresentou resultado semelhante ao SPEI6, com o ano verão de 1983/1984 sendo o mais seco já registrado

(SPEI4 = -2,87). Observa-se que eventos “excepcionalmente secos” foram observados, ambos, 2 vezes em todo o período estudado (Tabela 3).

Para a RM-Campinas, o SPEI6 (Figura 6e) no ano hidrológico 2013/2014 foi o mais seco, reforçando o que foi obtido com base no SPI. O SPEI6 foi igual a -2,84 enquanto o SPI6, -2,58. Isso significa que além do total precipitado no período chuvoso ter sido abaixo da média, a região apresentou elevados valores de temperatura, ampliando o déficit hídrico.

Diferente do que foi observado com base no SPI6, em que houve maior variabilidade de eventos extremos secos, apenas dois anos apresentaram eventos “excepcionalmente secos” para as regiões estudadas com base no SPEI6 (1983/1984 e 2013/2014). Na Figura 7a observa-se que o ano hidrológico 2013/2014 apresentou evento “excepcionalmente seco” em todas as regiões, enquanto que, baseado no SPI6, 3 regiões foram afetadas por este tipo de evento (Figura 5). O ano hidrológico 2013/2014 foi “extremamente seco” no Sudeste do Brasil com base no SPEI4 (Figura 7b). A principal diferença é a ocorrência desse seca com essa magnitude no verão de 1970/1971 para a RM-BH, ano este que se apresentou como “muito seco” nas regiões sul de Minas Gerais e RM-SP.

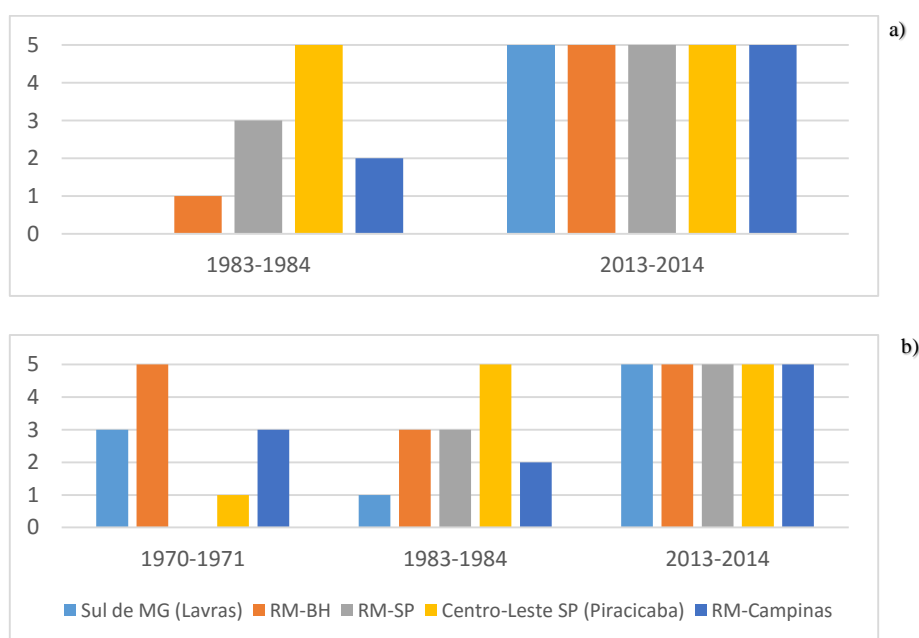


Figura 7. Anos “excepcionalmente secos” e a ocorrência de eventos de seca nas cidades observadas (a. com base no SPEI6; b. com base no SPEI4; 5= excepcionalmente seco, 4= severamente seco, 3= muito seco, 2= moderadamente seco, 1= anormalmente seco).

Da mesma forma que para o SPI, SPEI foi comparado entre as regiões, adotando-se o período de 1961 a 2016 como referência para todas as regiões. Para isso, na Tabela 3, apresentam-se as frequências de ocorrência do SPEI6 e SPEI4. Observa-se que o SPEI6, para a região centro-leste de São Paulo, apresentou um número maior de eventos de seca, sendo dois eventos “excepcionalmente secos” (1983/1984; 2013/2014), enquanto as demais regiões apresentaram somente um (2013/2014). A principal diferença entre os resultados de SPEI4 e SPEI6 encontra-se na quantidade de eventos “excepcionalmente secos” para a RM-BH (2 eventos) (Tabela 3). A quantidade total de eventos de seca observados com base no SPEI4 (Tabela 3) foi semelhante ao observado com base no SPEI6, com exceção da RM-BH e a região centro-leste de São Paulo, para as quais observou-se aumento na frequência.

Tabela 3. Frequência de ocorrência de eventos de seca observados entre 1961 e 2016 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil com base no SPEI6 e SPEI4.

NOAA (classificação)	Sul de MG (Lavras) – SPEI6	Sul de MG (Lavras) – SPEI4	RM Belo Horizonte (Nova Lima) SPEI6	RM Belo Horizonte (Nova Lima) SPEI4	RM São Paulo (São Paulo IAG) SPEI6	RM São Paulo (São Paulo IAG) SPEI4	Região Centro- Leste SP (Piracicaba) SPEI6	Região Centro- Leste SP (Piracicaba) SPEI4	RM Campinas (IAC) SPEI6	RM Campinas (IAC) SPEI4
Anormalmente Seco	4 1 evento/14 anos	2 1 evento/28 anos	6 1 evento/9 anos	9 1 evento/6 anos	3 1 evento/18 anos	6 1 evento/9 anos	4 1 evento/25 anos	10 1 evento/10 anos	5 1 evento/11 anos	4 1 evento/14 anos
Moderadamente Seco	5 1 evento/11 anos	8 1 evento/7 anos	4 1 evento/14 anos	4 1 evento/14 anos	7 1 evento/8 anos	5 1 evento/11 anos	8 1 evento/12 anos	7 1 evento/14 anos	5 1 evento/11 anos	7 1 evento/8 anos
Muito Seco	0 -	4 1 evento/14 anos	1 1 evento/55 anos	1 1 evento/55 anos	2 1 evento/28 anos	2 1 evento/28 anos	5 1 evento/20 anos	2 1 evento/50 anos	2 1 evento/28 anos	3 1 evento/18 anos
Severamente Seco	4 1 evento/14 anos	1 1 evento/55 anos	3 1 evento/18 anos	2 1 evento/18 anos	2 1 evento/28 anos	1 1 evento/55 anos	0 -	1 1 evento/99 anos	2 1 evento/28 anos	1 55 anos
Excepcionalmente Seco	1 1 evento/55 anos	1 1 evento/55 anos	1 1 evento/55 anos	2 1 evento/28 anos	1 1 evento/55 anos	1 1 evento/55 anos	2 1 evento/50 anos	2 1 evento/50 anos	1 1 evento/55 anos	1 1 evento/55 anos
Total	14	16	15	18	15	15	19	22	15	16

As variáveis precipitação e temperatura juntas permitiram ampliar a visualização e o entendimento dos eventos de seca, contudo, limitados ao período de 1961 a 2016 devido à falta de dados meteorológicos observados antes de 1961. O SPI não identifica padrões de crescimento na duração e magnitude de secas provocadas por altas temperaturas, enquanto o SPEI é sensível a esse parâmetro. Assim como o presente trabalho, Vicente-Serrano et al. (2009) encontraram uma diferença entre o SPI e o SPEI para a cidade de São Paulo entre 1910 e 2010. Os autores verificaram que o SPI não foi capaz de identificar os eventos de seca no começo da década de 2000, contudo, com a consideração do saldo do balanço hídrico (P-ET), foi possível identificar os efeitos deste período seco sobre a região mencionada, com o SPEI próximo de -4,0.

Vicente-Serrano et al. (2009) e Zargar et al. (2011) afirmam ainda que quando há ausência de tendência no crescimento da evapotranspiração, os resultados do SPI e SPEI geralmente são semelhantes, contudo, há algumas ressalvas. Para as regiões sul de Minas Gerais, RM-BH e RM-Campinas foram observadas tendências de crescimento significativas na evapotranspiração, conforme apresentado anteriormente. No entanto, o comportamento do SPI e do SPEI nessas regiões foi semelhante, o que pode significar que o déficit de precipitação foi suficiente para a caracterização de eventos de seca. Contudo, para a RM-SP, há tendência em ambas as séries históricas (evapotranspiração potencial e precipitação), tendo sido observados comportamentos diferentes do SPI e do SPEI na caracterização dos eventos de seca. Os valores mais negativos de SPI encontram-se no começo da série histórica, enquanto que com base no SPEI, 2013/2014 foi o ano mais seco da história da região RM-SP. Assim, a temperatura média elevada e, conseqüentemente, o potencial de evapotranspiração, tiveram maior impacto sobre a identificação da anomalia de seca nessa região.

4. Conclusões

A precipitação de verão (Dezembro – Março) corresponde a aproximadamente 75% do volume de precipitação ocorrida no período chuvoso (Outubro – Março) para as regiões do estudo. Nos anos hidrológicos com secas mais severas essa relação variou de 33 a 57,4%, demonstrando que tais eventos de secas estão associados a baixa precipitação de verão.

O estudo do comportamento da seca na RM-SP deve ser feito pela utilização do SPEI, uma vez que há tendência no crescimento da precipitação e um aumento significativo da evapotranspiração, levando saldos negativos do balanço hídrico (P – ET). Assim, verificou-

se que, principalmente após o ano 2000, ocorreram vários anos hidrológicos secos, tais como 2002/2003, 2003/2004, 2007/2008, 2013/2014 e 2014/2015.

O ano hidrológico de 2013/2014 foi o mais seco já registrado na região Sudeste do Brasil, com valores muito negativos de SPI e SPEI. Baseando-se no primeiro índice, a região metropolitana de Belo Horizonte foi a mais afetada com SPI6 de -3,45 e SPI4 de -3,15. Baseando-se no SPEI, a região metropolitana de São Paulo mostrou-se a mais sensível aos efeitos da seca com um SPEI6 de -2,96 e um SPEI4 de -3,78, o menor valor registrado no presente trabalho.

O SPI mostrou-se um índice de fácil cálculo e visualização dos episódios de seca. De 1933 a 2016, a região centro-leste de São Paulo e a região metropolitana de Belo Horizonte foram as que apresentaram os maiores episódios extremos de seca para o verão. Para os meses chuvosos, os resultados foram semelhantes.

Pelo SPEI verificou-se que anos “excepcionalmente secos” são eventos raros e que aconteceram em média, somente uma vez no período entre 1961 e 2016. A maior preocupação para gestores públicos, deve ser a persistência da seca durante mais de um ano hidrológico. Com altas temperaturas e ausência de precipitação, reservatórios de abastecimento de água e geração de energia elétrica, não são capazes de se recuperar.

5. Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade Instalada por Estado. Brasília-DF: 2018 Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?q=aneel&oq=aneel&aqs=chrome..69i57j69i60j0l2j69i60l2.1316j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>. Acesso em 02 jan. 2018

AHMAD, I. et al. Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's Rho tests in swat river basin, Pakistan. **Advances in Meteorology**, v. 2015, 2015.

AKBARI, H. et al. Drought Analysis Based on Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI) in Chenar Rahdar River Basin , Southern Iran. **Watershed Management** 2015, p. 11–22, 2015.

ALSTON, M.; KENT, J. **Social Impacts of Drought: A report to NSW Agriculture.** Wagga Wagga/ Australia: 2004

ANDEREGG, W. R. L. Spatial and temporal variation in plant hydraulic traits and their relevance for climate change impacts on vegetation. **New Phytologist**, v. 205, n. 3, p. 1008–1014, 2015.

ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 247–256, 2014.

BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717–726, 2001.

BAWDEN, A. J. et al. A spatiotemporal analysis of hydrological trends and variability in the Athabasca River region, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 333–342, 2014.

BLAIN, G. C. et al. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1067–1073, 2010.

BLAIN, G. C. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no Estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 114–124, 2010.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 anos de dados mensais do Índice Padronizado de Precipitação: série meteorológica de Campinas, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**. p. 287–294, 2011.

CALOIERO, T. et al. An Analysis of the Occurrence Probabilities of Wet and Dry Periods through a Stochastic Monthly Rainfall Model. **Water** vol.8, n. 2, 29 p.2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Drought in Brazil During Summer and Fall 2001 and Associated Atmospheric Circulation Features. *Circulation*, n. January, 2001.

CHANDA, K.; MAITY, R. Meteorological Drought Quantification with Standardized Precipitation Anomaly Index for the Regions with Strongly Seasonal and Periodic Precipitation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 12, p.512-525, 2015.

CHEN, H.; SUN, J. Changes in drought characteristics over china using the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5430–5447, 2015.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11–12, p. 3737–3752, 2016.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 769–784, 2016.

COPASA. Nível dos Reservatórios de Belo Horizonte e Nova Lima. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/abastecimento-de-agua/nivel-dos-reservatorios>>. Acesso em 11 fev. 2018.

DAS, P. K. et al. Trends and behaviour of meteorological drought (1901–2008) over Indian region using standardized precipitation–evapotranspiration index. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 909–916, 1 fev. 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Nível do Rio Piracicaba. Disponível em: <<https://www.saisp.br/geral/Processo.whtml?USERID=PuB&produto=56&ovlCode=ESP&OK=OK&BACKCOLOR=1&whichCode=0>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

ELKIN, C. et al. Short- and long-term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests in the European Alps. **Ecological Applications**, v. 25, n. 4, p. 1083–1098, 2015.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172–182, 2013.

GOMES, V. J. F. **O Meio Ambiente e o Risco de Apagão no Brasil**. II Seminário internacional. Reestruturação e regulação do setor de energia elétrica e gás natural. **Anais...**Rio de Janeiro: 2007

GOUVEIA, C. M. et al. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. **Global and Planetary Change**, v. 151, n. July, p. 15–27, 2017.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998

GROPPO, J. D. et al. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. **Geociências**, v. 24, n. 2, p. 181–193, 2005.

HAYES, M. Drought Indices. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. July, p. 18, 2002.

HIRSCHI, M. et al. Using remotely sensed soil moisture for land-atmosphere coupling diagnostics: The role of surface vs. root-zone soil moisture variability. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 246–252, 2014.

HOREL, J. D.; KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T. Atmospheric conditions in the Atlantic sector during 1983 and 1984. **Nature**, v. 322, n. 6076, p. 248–251, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades de São Paulo**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=35&search=sao-paulo>>.

KARAVITIS, C. A. et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. **Water**, v. 40, n.3 p. 200-219, 2011.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. New York: Oxford University Press, 1975.

KRISHNAN, P. et al. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 3–4, p. 208–223, 2006.

LESK, C.; ROWHANI, P.; RAMANKUTTY, N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. **Nature**, v. 529, n. 7584, p. 84–87, 2016.

LIU, W. T. H.; MASSAMBANI, O.; NOBRE, C. A. Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 14, n. 3, p. 343–354, 1994.

LIVADA, I.; ASSIMAKOPOULOS, V. D. Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 89, n. 3, p. 143–153, 2007.

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

MARENGO, J. A. et al. 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. et al. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v. 106, n. September 2015, p. 31–44, 2015.

MARKHAM, C. G.; MCLAIN, D. R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, northeastern Brazil. **Nature**, v. 265, p. 320–325, 1977

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology**, n. 1. January, p. 17–22, 1993.

MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas**. Lavras, MG: Editora UFLA, 2013.

MINUZZI, R. B.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C. Oscilações climáticas em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 227–236, 2010.

MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203–214, 2015.

NAGHETTINI, M. & PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. **Tellus**, v. 4, p. 336–343, 1972

National Oceanic and Atmospheric Administration. Drought Index: Standard Precipitation Index. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Drought/Monitoring/spi.shtml>>. Acesso em: 15-de dez. 2017

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. February, p. 252–262, 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. et al. Relação Entre o Standardized Precipitation Index (SPI) e os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia **Floresta e Ambiente** v. 25, n. 2, 2017.

OTKIN, J. A. et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218–219, p. 230–242, 2016.

OTTO, J. et al. Forest summer albedo is sensitive to species and thinning: How should we account for this in Earth system models? **Biogeosciences**, v. 11, n. 8, p. 2411–2427, 2014.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. Washington, D.C: 1965. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>>.

PANDEY, R.; S. RAMASASTRI, K. Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency. **Hydrological Processes** v. 15, p. 1019-1032, 2001

RAIMUNDO, C. DO C.; SANSIGOLO, C. A.; MOLION, L. C. B. Tendências das classes de Precipitação na Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 397–408, 2014.

RAO, V. B.; HADA, K.; HERDIES, D. L. On the severe drought of 1993 in north-east Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 15, n. 6, p. 697–704, 1995

SALAMI, A. W. et al. Trend Analysis of Hydro-meteorological variables in the coastal area of Lagos using Mann-Kendall trend and Standard Anomaly Index methods. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 20, n. 3, p. 797–808, 2016.

SANASA. **INFORMAÇÕES SOBRE INTERRUPÇÕES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2014/10/campinas-tem-5-dia-seguido-de-falta-de-agua-com-20-da-cidade-afetada.html>>. Acesso em: 30 mar. 2018

SCHLESINGER, W. H. et al. Forest biogeochemistry in response to drought. **Global change biology**, v. 22, n. 7, p. 2318–2328, 2016.

SEILER, R. A.; HAYES, M.; BRESSAN, L. Using the standardized precipitation index for flood risk. *International Journal of Climatology*, v. 1376, n. 8, p. 1365–1376, 2002.

SMITH, L. T. et al. Drought impacts on children's respiratory health in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 4, p. 1–8, 2014.

SPAROVEK, G.; DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 27, n. 2, p. 257–266, 1 fev. 2007.

STAGGE, J.; TALLAKSEN, L. Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)*, v. 10, p. 367–373, 2014.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

TOLENTINO, P. L. M. et al. Projected impact of climate change on hydrological regimes in the Philippines. *Plos one*, v. 11, n. 10, p. 1–14, 2016.

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, 19 nov. 2009.

VINCENT, L. A. et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *Journal of Climate*, v. 18, n. 23, p. 5011–5023, 2005.

VIRGENS FILHO, J. S. DAS et al. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. *Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 3, p. 538–547, 2013

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: Concepts and Definitions. In: **Drought: A Global Assessment**. 1st Edition ed. London: Routledge Publishers, 2000. v. 69p. 3–18.

WILLIAMSON, G. B. et al. Amazonian tree mortality during the 1997 El Nino drought. *Conservation Biology*, v. 14, n. 5, p. 1538–1542, 2000.

WMO; GWP. **Handbook of drought indicators and indices**. Genebra, Suíça: 2013

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought monitoring and early warning : concepts, progress and future challenges**. Geneva, 2006

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Genebra, Suíça: 2010

YANG, J. X.; LIJUAN, X. C.; YOUJIN, W. Research on determination of station indexes and division of regional flood/ drought grades in China. **Quartely Journal of Applied Meteorology**, v. 8, n. 1, p. 26–33, 1997

ZARGAR, A. et al. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.

ZELEKE, T. T.; GIORGI, F.; ZAITCHIK, B. F. Trend and periodicity of drought over Ethiopia. **International Journal of Climatology**, 2017.

ZENG, N. et al. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, 2008

CAPÍTULO 2

Impactos de Mudanças Climáticas sobre Eventos de Seca em Regiões

Estratégicas do Sudeste do Brasil

SILVA, V.O. e MELLO, C. R. de

Resumo

A região Sudeste do Brasil é estratégica na produção de energia, alimentos, geração de empregos e concentra grande parte da população brasileira. As secas, fenômenos meteorológicos naturais, podem afetar diretamente a agricultura, pecuária, abastecimento de água, produção de energia elétrica e turismo. Determinar possíveis impactos e sua ocorrência futura pode ajudar pesquisadores e gestores públicos a evitarem e mitigarem possíveis impactos desse fenômeno. O objetivo deste estudo foi analisar, com base nos índices SPI (“*Standard Precipitation Index*”) e SPEI (“*Standard Precipitation Evapotranspiration Index*”), a frequência de secas no centro-sul da região Sudeste do Brasil, caracterizada por três regiões metropolitanas (São Paulo: RM-SP; Campinas: RM-Campinas; e Belo Horizonte: RM-BH), a região sul de Minas Gerais (Lavras) e a região centro-leste de São Paulo (Piracicaba) por meio de projeções dos modelos regionais Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES em dois cenários do IPCC, RCP 4.5 e 8.5, até o fim do século XXI. O SPI tende a projetar eventos de seca em blocos para o modelo Eta-HadGEM2-ES, com inúmeros eventos de seca ocorrendo de forma consecutiva, enquanto o modelo Eta-MIROC5, tende a projetar situações mais próximas do observado, com valores intercalando entre o positivo e o negativo. O SPEI apresentou valores similares ao SPI para o modelo Eta-MIROC5, uma vez que o modelo simula o crescimento da precipitação e o balanço hídrico vertical ($P - E_{tp}$) não é tão afetado pelo crescimento da temperatura. O cenário 8.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES projeta as piores condições de seca no fim do século XXI para as regiões estratégicas do sudeste, caso as emissões de gases do efeito estufa ocorram. De maneira geral, as projeções não mostram a intensificação dos episódios de seca, mas projetam períodos longos de seca, que podem afetar o abastecimento de água e a economia de toda região sudeste.

Palavras-chave: Índices de Seca, Mudanças climáticas, modelos climáticos, climatologia

1. Introdução

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela abundância de seus recursos hídricos. Entretanto, devido às alterações no clima global, ocasionado pela intensificação do efeito estufa, essa situação poderá se alterar nas próximas décadas. Regiões populosas e com economia dinâmica, como o Sudeste, já estão sendo severamente impactadas pela escassez de água, e poderão ter suas economias e o meio ambiente seriamente afetados por episódios de seca no futuro próximo.

A aceleração do aquecimento global registrada nas últimas décadas pode modificar a dinâmica do ciclo hidrológico, afetando o padrão espacial e temporal da precipitação, evapotranspiração e do escoamento superficial, levando à ocorrência de eventos extremos cada vez mais severos (Wang et. al 2013). Assim, eventos naturais, como secas, podem se tornar cada vez mais intensos nas próximas décadas. Estima-se que eventos climáticos extremos podem representar um custo adicional de US\$80 bilhões anualmente (INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS, 2011).

Os estados de São Paulo e Minas Gerais possuem juntos mais de 30% da população, 40% do Produto Interno Bruto (PIB) e um quarto de toda a capacidade de geração de energia hidroelétrica do Brasil (ANEEL, 2017; IBGE, 2016). Entre 2013 e 2015, regiões de os estados, tais como sul de Minas Gerais, regiões metropolitanos de São Paulo, Belo Horizonte e Campinas, enfrentaram um período de estiagem muito intenso e prolongado, em que foram registrados volumes de chuva muito abaixo das médias históricas para o período chuvoso de 6 meses (Outubro a Março) e para o período chuvoso de 4 meses (Dezembro a Março). Esta situação anômala do clima gerou a seca mais intensa observada na região nos últimos 100 anos (Oliveira, 2018).

Secas são fenômenos naturais caracterizados pela ausência ou volume insuficiente de precipitação sobre uma região, especialmente durante o período chuvoso desta (CHANDA e MAITY, 2015). Segundo Caloiero et al. (2016), esses eventos provocam desequilíbrio natural temporário na disponibilidade de água em níveis abaixo da média histórica, refletindo negativamente na agricultura, no abastecimento, geração de energia e na economia de forma geral. A Organização Meteorológica Mundial (WMO) (2016) difere seca de aridez, uma vez que a última é uma característica permanente do clima, própria de regiões desérticas e semiáridas.

Índices são ferramentas que agregam, simplificam e condensam informações através de um número de fácil entendimento. Dessa maneira, índices de seca que utilizam somente valores de precipitação, como o “Standard Precipitation Index” (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) e o China-Z Index (CZI) (YANG; LIJUAN; YOUMIN, 1997), e índices que utilizam o balanço hídrico atmosférico, como “Standard Precipitation Evapotranspiration Index” (SPEI) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2009) e o Índice de Palmer (PALMER, 1965), surgiram como ferramentas importantes para o entendimento da frequência de ocorrência de secas e suas intensidades.

O *Standard Precipitation Index* (SPI) (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993) permite analisar a magnitude do evento de seca, sua duração e o intervalo de tempo entre os diferentes eventos. (WMO; GWP, 2016). A simplicidade de obtenção de seus valores e sua ampla utilização em episódios de seca em todo mundo (HAYES, 2002), fizeram com que a Organização Meteorológica Mundial, sugerisse, em 2009, este índice como ferramenta importante na identificação desses eventos (WMO; GWP, 2016). Entre suas vantagens, destacam-se: a precipitação é o único dado de entrada do índice; é adaptado a várias escalas de tempo, sendo útil a estudos agrícolas, hidrológicos e meteorológicos; e pode ser usado para comparar regiões com climas diferentes (ZARGAR et al., 2011).

O *Standard Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI) foi desenvolvido e proposto por Vicente-Serrano et al. (2009) também para a análise de eventos de seca. O SPEI agrega a temperatura em seus cálculos por meio da estimativa da evapotranspiração potencial. Assim, os eventos de seca podem ser avaliados através do balanço hídrico atmosférico ($P - ET$), refletindo no déficit hídrico. O SPEI tem sensibilidade maior que o SPI, consistindo de uma ferramenta adicional para avaliar a ocorrência de eventos de seca anômalas (WMO; GWP, 2016).

Uma das formas de se estudar o comportamento hidrológico futuro consiste do uso de Modelos de Simulação do Clima Global (GCMs) e seus impactos sobre a região/bacia hidrográfica de interesse. Tais modelos geram informações que possibilitam entender como diferentes cenários de gases de efeito estufa podem influenciar o clima do planeta (CHOU et al., 2014a). Porém, para se obter uma análise mais detalhada regionalmente é necessário proceder com a regionalização (“downscaling”) dos resultados obtidos globalmente, acoplando um modelo regional. Dentre esses, o modelo ETA (BLACK, 1994; MESINGER, 1984), foi aperfeiçoado e aplicado para toda América do Sul por Chou et al. (2014a, b), com resolução espacial de 20 km.

O modelo MIROC5 (ou Modelo Interdisciplinar para Pesquisas do Clima) foi desenvolvido por agências de pesquisas japonesas para que fizesse parte do quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). Watanabe et al. (2010) afirmam que o modelo apresentou melhoras na simulação da precipitação e nas simulações de ocorrência do fenômeno El-Niño, sendo uma boa ferramenta para a simulação de secas futuras. Gupta e Jain (2017) utilizaram dados do modelo MIROC5 para analisar e quantificar eventos futuros de seca pelos índices SPI e SPEI na Índia e verificaram diferença entre os índices, uma vez que o SPI não considera os efeitos da seca associados ao aumento da temperatura. Chou et al. (2014b) analisaram impactos de mudanças climáticas na América do Sul até o final do século XXI oriundos de dois cenários, RCP 4.5 e 8.5, e verificaram que, de maneira geral, o modelo regional ETA acoplado ao modelo MIROC5, tende a superestimar os valores de precipitação nos períodos chuvosos e a subestimar nos períodos mais secos.

O modelo HadGEM2-ES foi desenvolvido pelo Hadley Centre da Inglaterra, cujo objetivo é simular e entender o clima futuro a partir de respostas de equações que descrevem processos químicos, biológicos e físicos dentro da atmosfera, oceano, criosfera e biosferas marinha e terrestre (COLLINS et al., 2011). Good et al. (2012) estudaram o possível impacto de mudanças climáticas no século XXI em florestas do mundo com esse modelo e verificaram que principal impacto nas florestas pode ser o prolongamento das estações de seca. Chou et al. (2014a) acoplaram o modelo Eta ao modelo HadGEM2-ES para avaliar o efeito das mudanças climáticas sobre a América do Sul considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, e verificaram que, de maneira geral, o modelo tende a subestimar a precipitação, distribuindo seu valor total durante os meses do ano. Sordo-Ward et al. (2017) aplicaram o SPEI utilizando saídas do modelo HadGEM2-ES para analisar episódios de seca futuros na bacia do Rio da Prata e verificaram que, no futuro próximo, episódios de seca podem se tornar menos intensos nas regiões próximas ao Uruguai e que na região do Paraná e do Paraguai os episódios podem se tornar mais intensos.

O presente estudo foi realizado com base em dados simulados de precipitação e temperatura de 1961 a 2005 (“Tempo Presente” ou “Baseline”) e de 2007 a 2099 pelos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do Quinto Relatório do IPCC, em 5 cidades da região centro-sul do Sudeste do Brasil, representando regiões estratégicas para o desenvolvimento econômico do país: regiões metropolitanas de São Paulo, Belo Horizonte e Campinas; a região Sul de Minas

Gerais, notadamente importante pelo potencial de geração hidrelétrica e produção de café de alta qualidade, e a região centro-leste do estado de São Paulo, cujo potencial agrícola, especialmente associado a cana-de-açúcar, é estratégico para a produção de bioenergia no Brasil.

No contexto de mudanças climáticas e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica, este estudo teve como objetivos: (i) analisar o impacto de mudanças climáticas sobre o comportamento temporal e a frequência de eventos de seca até o final do século XXI projetados por dois modelos climáticos e dois cenários de emissão de gases do efeito estufa, em regiões estratégicas do Sudeste do Brasil; e (ii) analisar os índices Standard Precipitation Index (SPI) e o Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) como indicadores efetivos para predição futura de eventos de seca.

2. Material e Métodos

2.1. Base de Dados

Para previsão e identificação de potenciais ocorrências futuras de seca, foram utilizados neste estudo dados de precipitação diária extraídos dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 regionalizados pelo modelo Eta. Os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 são modelos de circulação global com resoluções espaciais de 300 Km, portanto, suas saídas não são indicadas para análises regionais. Dessa maneira, os modelos foram acoplados ao modelo regional Eta, que produziu sua regionalização e sua disponibilização em células de grade de 20 km (Chou et al. 2014a, b). Os modelos foram simulados com base nos cenários RCP 4.5 e RCP8.5. O primeiro consiste de um cenário intermediário com uma previsão de aquecimento da superfície do planeta de 1,1 a 2,6°C até o fim do século XXI; o segundo consiste de um cenário mais pessimista, simulando um aumento contínuo de temperatura da superfície do planeta que pode chegar até 5,0°C aproximadamente.

Assim, foram utilizados dados simulados para cinco cidades do Sudeste: Lavras e Nova Lima, no estado de Minas Gerais; Campinas, São Paulo e Piracicaba, no estado de São Paulo. A escolha dessas estações foi baseada, primeiramente, na disponibilidade de dados históricos climáticos que permitem uma análise robusta de desempenho dos modelos climáticos para o tempo presente. Além disso, essas cidades representam pólos importantes de atividades econômicas associadas à agricultura, indústria e geração de energia hidrelétrica. Neste contexto, a cidade de Lavras (com disponibilidade de 102 anos de dados pluviométricos consistidos pelo INMET) representa o sul de Minas Gerais, região com alto

potencial para geração de energia hidrelétrica (bacia do rio Grande), tendo-se o reservatório de Furnas o maior e mais importante do Sudeste, além de ser a principal região produtora de café arábica do mundo. A cidade de Nova Lima (com 160 anos de dados consistidos pelo INMET) representa a RM-BH, a terceira maior do país, com quase 5 milhões de habitantes. A RM-SP (dados consistidos pelo IAG/USP, 80 anos de dados), que é a maior do Brasil e uma das maiores do mundo, com mais de 20 milhões de habitantes. A região de Piracicaba (com 98 anos consistidos pela ESALQ/USP), no centro-leste do estado de São Paulo, possui um dos maiores PIB agrícolas do país, responsável por expressiva produção de bionergia. Finalmente, a RM-Campinas (com 108 anos de dados), a 4ª região metropolitana do Sudeste e a 10ª do país, com uma atividade agroindustrial das mais relevantes para o PIB do estado de São Paulo e, por extensão, para o Brasil.

Para a análise do comportamento futuro das secas, foram selecionados os pontos de célula que mais se aproximavam das coordenadas geográficas de estações meteorológicas deste estudo (Figura 1). Os dados foram, então, agrupados mensalmente e séries históricas com os totais acumulados de outubro a março (período chuvoso de 6 meses) e dezembro a março (período chuvoso de 4 meses) foram estruturadas. Na Figura 1 apresenta-se a localização dessas cidades sua inserção no quadrante de seca observado por Coelho et al. (2015) e Nobre et al. (2016) referente ao ano hidrológico 2013/2014.

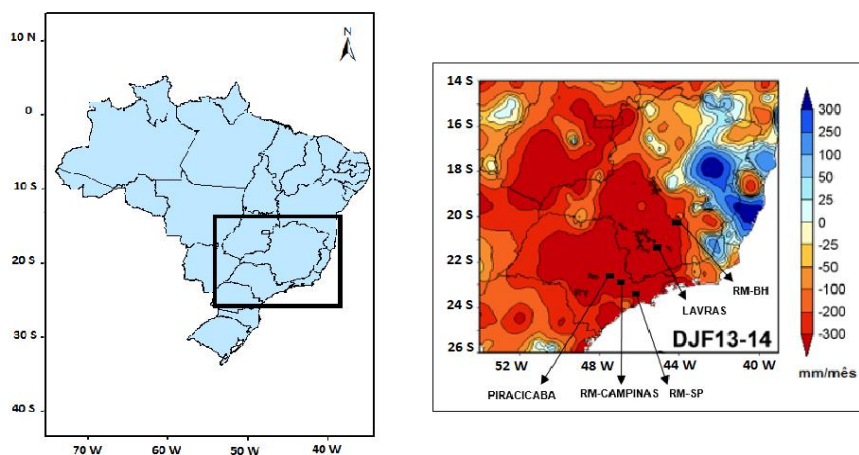


Figura 1. Localização geográfica das estações meteorológicas aplicadas ao presente estudo e sua inserção no quadrante de seca do Sudeste do Brasil caracterizado por Nobre et al. (2016).

Vários estudos apontam a presença de erros numéricos sistemáticos em modelos climáticos globais e regionais (BRUYÈRE et al., 2014; EHRET et al., 2012; LAFON et al., 2013). Segundo a WMO (2008), viés é a correspondência entre a média da previsão e a

média da observância sobre um certo domínio e tempo. Para os cálculos foram utilizados os dados das séries históricas dos postos meteorológicos acima no período de 1961 a 2005, mesmo período em que os modelos regionais geram suas séries históricas conhecidas como “baseline” ou tempo presente. Assim, calculou-se a média mensal para cada cidade e com base em ambos os modelos, de forma a estimar um multiplicador que permita a correção deste viés. Para remover os erros sistemáticos foi utilizada uma correção linear (eq. 1) (Teutschbein e Seibert 2012).

$$X^*_{RCM} = X_{RCM} * \frac{\mu_{XCON}}{\mu_{XRCM}} \quad (1)$$

em que X^*_{RCM} se refere à precipitação ou temperatura do modelo climático corrigida, μ_{XCON} , a média mensal da série histórica observada e μ_{XRCM} , a média mensal gerada pelo modelo e cenário, e X_{RCM} , a precipitação ou temperatura mensal simulada pelo modelo.

Para verificação de tendência temporal na série histórica de precipitação e evapotranspiração potencial, o teste de Mann-Kendal (Mann, 1945; Kendall, 1975) foi aplicado. O teste considera a hipótese de estabilidade temporal, em que observações consecutivas ocorrem de forma independente e não há alteração da distribuição de probabilidades no tempo, ou seja, a série é considerada estacionária.

2.2. Standard Precipitation Index (SPI)

Para o cálculo do SPI, aplicou-se a função densidade de probabilidades (FDP) Gama 2 parâmetros para modelar as frequências das séries históricas de precipitação dos 4 e 6 meses mais chuvosos (SPI4 e SPI6, respectivamente), conforme Mckee et al. (1993) e Coelho et. al (2016), ajustada com base no método da máxima verossimilhança.

$$FDP: f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha * \Gamma(\alpha)} * x^{\alpha-1} * e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (2)$$

Sendo β e α os parâmetros de posição e escala da FDP.

O SPI é definido como sendo o valor de “z” correspondente a cada frequência de não-excedência estimada pela FDP Gama, o que se obtém a partir da inversa da FDP padronizada de Gauss. A classificação proposta pelo Centro Nacional de Dados Climáticos (NCDC) do Serviço de Administração da Atmosfera e do Oceano dos Estados Unidos (NOAA) divide o SPI em 5 faixas, associando a intensidade das secas: extremamente seco:

SPI < - 2; severamente seco: $-2 \leq \text{SPI} < -1.60$; muito seco: $-1.60 \leq \text{SPI} < -1.30$; moderadamente seco: $-1.30 \leq \text{SPI} < -0.80$; anormalmente seco: $-0.80 \leq \text{SPI} < -0.51$.

2.3. Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

O Standard Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) analisa, além da precipitação, o efeito da temperatura nos episódios de seca a partir da estimativa da evapotranspiração potencial. Vicente-Serrano et al. (2009) sugerem que o efeito da temperatura seja observado através da estimativa da evapotranspiração potencial. Assim, o SPEI reflete um déficit hídrico estimado pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial no período considerado ($P - ET$).

Estudos realizados por Begueria et al. (2014) e McEvoy et al. (2012) encontraram resultados semelhantes para o SPEI utilizando os métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith, sendo o primeiro o mais indicado para o cálculo na ausência de dados meteorológicos mais detalhados. Dessa maneira, adotou-se para o cálculo da evapotranspiração potencial o método de Thornthwaite (1948) como sugerido por Vicente-Serrano et al. (2009), o qual está detalhado nas equações abaixo.

$$ETp = 16K * \left(\frac{10T}{I}\right)^m \quad (3)$$

em que T_i é a temperatura média mensal i , em °C, e I é calculado pela soma mensal deste, conforme equação 3:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514} \quad (4)$$

Na equação 3, m é o coeficiente que depende de I e pode ser calculado por:

$$m = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (5)$$

K é um coeficiente de correção para a latitude e mês, dado por:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{NDM}{30}\right) \quad (6)$$

em que NDM é o número de dias no mês e N é o número máximo de horas de sol, que é calculado por:

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) \varpi \quad (7)$$

em que ϖ é a angulação do sol, que é calculada por:

$$\varpi = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (8)$$

φ é a latitude, em radianos, e δ é a declinação do sol, em radianos, calculada por:

$$\delta = 0,4093 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi J}{365} - 1,405 \right) \quad (9)$$

J é o dia juliano médio do mês.

A série histórica de P – ET foi desenvolvida para o período de Outubro a Março (SPEI6), e Dezembro a Março (SPEI4). Para o cálculo do SPEI foi utilizada a distribuição Generalizada de Extremos (GEV), como sugerida por Stagge e Tallaksen (2014), uma vez que o balanço hídrico não é limitado a zero (a evapotranspiração pode ser maior que a precipitação, gerando valores negativos). A distribuição GEV possui a seguinte estrutura:

$$FDP = \frac{1}{\sigma} * \left[1 - \varepsilon * \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right]^{\left(\frac{1}{\varepsilon-1} \right)} * \exp \left\{ - \left[\frac{x-\mu}{\sigma} \right]^{\frac{1}{\varepsilon}} \right\} \quad (10)$$

Em que ε , σ e μ são, respectivamente, os parâmetros de forma, escala e posição. Se o valor de $\varepsilon < 0$, a GEV representa a forma assintótica de valores mínimos e existe se $x > \frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$. Se $\varepsilon > 0$, GEV representa uma distribuição de máximos se $x < \frac{(x-\mu)}{\varepsilon}$ (NAGHETTINI, 2017).

Após a aplicação desta distribuição, o procedimento para cálculo do SPEI é o mesmo do SPI. Vicente-Serrano et al. (2009) não apontam uma classificação específica para o SPEI, mas compara os resultados ao SPI correspondente. Dessa maneira, adotou-se os mesmos intervalos e a mesma classificação segundo os critérios do NOAA para o SPI.

3. Resultados e Discussão

3.1. Projeção futura da precipitação nas regiões estudadas do sudeste do Brasil

Nas tabelas 1 e 2 estão apresentados os dados médios de precipitação para as séries estudadas correspondentes ao período chuvoso de 4 meses (P4) e período chuvoso de 6 meses (P6) observados e simuladas pelos modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, para os o tempo presente (Baseline) e para o tempo futuro.

Comparando-se o tempo presente com os dados observados médios para a região Sul de Minas Gerais, observou-se uma variação percentual de 2,4% para o período P6, enquanto, que para o período P4, a variação foi de 0,5%. Para o modelo Eta-MIROC5, no entanto, os valores simulados foram 38,8% e 25,6%, para P6 e P4, respectivamente, mostrando-se menos preciso.

O modelo Eta-HadGEM2-ES projeta, para ambos os cenários, uma acentuada redução da precipitação média para o período P6 (31% para o RCP4.5 e 38,9% para o RCP8.5) e para o período P4 (27,7% para o RCP4.5 e 33% para o RCP8.5) ao longo do século em relação ao tempo presente. Não foram observadas tendências nas séries de precipitação para o modelo.

Com base no modelo Eta-MIROC5, a redução da precipitação no período P6 pode ser até de 32,7% para o RCP 4.5 e 31,9% para o RCP 8.5, enquanto a redução no período P4 pode ser de 28,4% para o RCP 4.5 e 27,2% para o RCP 8.5. A análise ao longo do século XXI projetada por esse modelo consiste de uma tendência negativa da precipitação até o final do século para o cenário RCP 4.5 de $2,0 \text{ mm.quadrimestre}^{-1}$ e $2,6 \text{ mm.semestre}^{-1}$, respectivamente, para os períodos P4 e P6.

A região metropolitana de Belo Horizonte apresenta as maiores médias observadas entre as cidades do estudo. O modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou uma redução de 31,8% para o período P6 e 32,4% para o período P4, quando comparado aos dados médios observados. Para o modelo Eta-MIROC, houve um aumento de 7,4% para o período de outubro a março e uma redução de 8,2% para o período de dezembro a março, mostrando-se mais preciso para a região.

O modelo Eta-MIROC5 apresenta para o período P6 média 525 mm (57%) maior e para P4, 236 mm (35,9%) maior do que as projetadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. O modelo Eta-MIROC5, por sua vez, projeta uma redução de 6,7% para o RCP4.5 e 17,9% para o RCP8.5 para o período P6; para o período P4 esse modelo projeta um aumento de 7,8% considerando o cenário RCP4.5, e uma redução de 6,7% para o RCP8.5. Considerando as projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES, observa-se um aumento de 14% para o RCP 4.5 e uma redução de 8% para o RCP 8.5, sobre o valor médio da precipitação para o período P6 ao longo do século. Para o período P4, espera-se um aumento de 20,3% considerando o cenário RCP4.5, e um aumento de 0,4% para o RCP8.5.

A região metropolitana de São Paulo apresentou comportamento semelhante na comparação entre o tempo presente e os dados observados. O modelo Eta-HadGEM2-ES simulou uma redução nos valores médio dos períodos de P6 e P4, de -19,8% e -28,6%,

respectivamente. Para o modelo Eta-MIROC5, a variação percentual foi de -1,22% e -9,5%, para os períodos P6 e P4, mostrando-se mais preciso na simulação dos dados.

Analisando os dados futuros com o tempo presente, nota-se uma redução média na precipitação para os períodos P4 e P6 projetadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES ao longo do século XXI, enquanto que, com base no modelo Eta-MIROC5, foi projetado aumento da precipitação para os períodos P4 e P6. O modelo Eta-HadGEM2-ES simulado com base nas premissas do RCP8.5 (cenário mais pessimista) apresentou uma redução maior do que para o cenário 4.5, tanto para P6 quanto para P4. Contudo, as projeções do modelo Eta-MIROC5 demonstraram aumento superior a 50% da precipitação em relação ao tempo presente ao longo do século, considerando ambos os cenários, e tanto para P6 quanto para P4. Chou et al. (2014a) avaliaram que o modelo Eta-HadGEM2-ES tende a simular uma distribuição maior da chuva durante o ano, o que explica a redução encontrada no período chuvoso, enquanto o modelo Eta-MIROC5 concentra os valores de chuva nas estações mais chuvosas, mantendo o padrão atual do regime pluvial da região. Assim, foi observada tendência positiva de crescimento com o modelo Eta-MIROC5 para o cenário 8.5, correspondentes a 6,3 mm quadrimestre⁻¹ e 30,3 mm semestre⁻¹.

Na região Centro-Leste de São Paulo observou-se que as simulações realizadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES se assemelham aos dados observados. A variação percentual para o período P6 foi de 7,17% e para o período P4, -0,6%. A diferença observada pelo modelo Eta-MIROC5, foi respectivamente de 28,7% e 15,33%.

O modelo Eta-HadGEM2-ES em relação ao tempo presente, apresentou um decréscimo maior nos valores para o período P6, que obteve-se uma redução de 31,1% e 38,2% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, e para o período P4, 30,8% e 35,6%, respectivamente, para RCP4.5 e RCP8.5.

Com base nas projeções do modelo Eta-MIROC5, observou-se um aumento de 7,1% e 8,4% da precipitação para o período P6 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, e uma redução de 2,5% (RCP 4.5) e 3,6% (RCP 8.5) para o período -P4 foi observada em relação ao tempo presente, ao longo do século. Observou-se que para o período P6, sob condições do cenário 8.5, a precipitação projetada pelo modelo Eta-MIROC5, aumentou a uma taxa de 4,6 mm.semestre⁻¹, ao longo do século em relação ao tempo presente, contudo, decresceu 2,3 mm.quadrimestre⁻¹, no cenário 4.5 com o modelo Eta-HadGEM2-ES, e cresceu a uma taxa de 4,6 mm.quadrimestre⁻¹ no cenário 8.5 com o modelo Eta-MIROC5.

Similar a região centro-leste do estado, a região metropolitana de Campinas apresentou valores simulados médios para o tempo presente, próximos do observado. Para o período de outubro a março a variação percentual foi de 4,74% e, para o período de dezembro a março, -2%. Para o modelo Eta-MIROC5, essa variação em relação aos dados observados foi de 27,3% e 14,5%

Observa-se que o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou uma redução da precipitação para o período P6 ao longo do século XXI de 32,3% e 37,4% para o RCP4.5 e RCP8.5, respectivamente, enquanto que para o período P4, uma redução de 32,5 e 35%. O modelo Eta-MIROC5 projetou um decréscimo da precipitação para P6 de 22% para ambos os cenários. Para o período P4, o modelo simulou um decréscimo de 19,2% (RCP 4.5) e 20,4% (RCP 8.5). A análise temporal mostrou um decréscimo de 4mm.semestre^{-1} para o período P6 com o modelo Eta-HadGEM2-ES e cenário RCP8.5, e de $3,6\text{ mm.quadrimestre}^{-1}$ para o período P4 ao longo do século XXI.

O tempo presente simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES se aproximou mais do observado nas regiões sul de Minas Gerais, RM-Campinas e região centro-leste do estado de São Paulo, quando comparados os períodos de 1961 a 2005. Já para a região metropolitana de Belo Horizonte e São Paulo, a variação percentual entre o observado e simulado foi menor para o modelo Eta-MIROC5.

De maneira geral, observou-se que o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou valores de precipitação para os períodos P4 e P6 menores que o modelo Eta-MIROC5 nas regiões estudadas do Sudeste do Brasil. Segundo Chou et al. (2014b), o modelo Eta-HadGEM2-ES tende a simular uma redução de precipitação o que levará à intensificação de episódios de seca até o final do século XXI, enquanto o modelo Eta-MIROC5 projeta aumento da precipitação até o fim do século, portanto, levando a um menor impacto nas secas futuras.

Comparando-se os cenários, o RCP4.5 tende a gerar valores de precipitação superiores aos projetados com base no cenário 8.5. A única exceção foi observada para a região sul de Minas Gerais, e para a RM-SP, com o modelo Eta-MIROC5. CUBASCH et al. (2013), no relatório do quinto painel do IPCC, afirmam que o cenário RCP 8.5 apresenta uma situação mais pessimista em relação ao cenário RCP 4.5 e esperam uma redução da precipitação sobre a região centro-leste do Brasil, portanto, episódios de seca mais frequentes.

Tabela 1. Precipitação Média simulada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para as regiões do sudeste do Brasil estudadas para o tempo presente e ao final do século XXI.

		Dados Observados (1961 -2005)		Baseline Eta- HadGEM2-ES (1961-2005)		Eta-HadGEM2-ES 4.5 (2007-2099)		Eta-HadGEM2-ES 8.5 (2007-2099)	
		P6	P4	P6	P4	P6	P4	P6	P4
Sul de Minas Gerais (Lavras)	Média	1251,58	911,90	1281,1	916,21	883,42	662,44	783,21	613,78
	Desvio	209,44	206,35	440,91	325,68	366,32	289,59	409,1	325,87
RM-BH	Média	1342,74	973,61	916,32	657,96	1045,28	791,42	841,99	660,85
	Desvio	292,07	288,64	334,08	247,97	515,13	400,83	461,18	354,52
RM-SP	Média	1088,18	820,73	845,24	570,47	759,94	522,74	696,69	493,74
	Desvio	157,90	152,20	253,15	185,18	343,58	276,27	400,41	331,22
Região leste de SP (Piracicaba)	Média	1002,59	744,78	1065,33	747,67	733,75	517,73	658,42	481,58
	Desvio	228,30	192,87	318,7	247,14	287,69	219,87	339,15	272,77
RM-Campinas	Média	1089,41	822,10	1137,37	802,89	769,48	540,93	712,43	522,05
	Desvio	213,95	195,63	357,47	280,88	308,83	236,3	410,84	341,18

Tabela 2. Precipitação Média simulada pelos modelo Eta-MIROC5 para as regiões do sudeste do Brasil estudadas para o tempo presente e ao final do século XXI.

		Dados Observados (1961 -2005)		Baseline Eta- MIROC5 (1961-2005)		Eta-MIROC5 4.5 (2007-2099)		Eta-MIROC5 8.5 (2007-2099)	
		P6	P4	P6	P4	P6	P4	P6	P4
Sul de Minas Gerais (Lavras)	Média	1251,58	911,90	1737,55	1145,15	1169,45	820,19	1183,49	834,22
	Desvio	209,44	206,35	300,21	262,72	252,81	223,11	270,05	201,15
RM-BH	Média	1342,74	973,61	1442,15	894,19	1346,08	963,71	1183,49	834,22
	Desvio	292,07	288,64	264,22	222,28	344,5	307,58	270,05	201,15
RM-SP	Média	1088,18	820,73	1040,53	723,23	1626,27	1083,81	1669,2	1099,17
	Desvio	157,90	152,20	185,08	158,16	306,11	246,8	304,73	238,61
Região leste de SP (Piracicaba)	Média	1002,59	744,78	1279,56	867,68	1370,82	845,74	1386,65	836,63
	Desvio	228,30	192,87	220,6	190,95	269,76	208,75	275,82	170,99
RM- Campinas	Média	1089,41	822,10	1381,94	938,1	1076,47	757,56	1078,02	746,31
	Desvio	213,95	195,63	246,5	209,76	211,78	178,2	217,21	166,4

3.2. Projeção futura da evapotranspiração potencial nas regiões estudadas do sudeste do Brasil

Nas tabelas 3 e 4 estão apresentados os valores de evapotranspiração potencial para os períodos P6 (ETp6) e P4 (ETp4). Devido ao acréscimo de gases de efeito estufa, conforme os cenários, espera-se que ambos os modelos projetem valores de evapotranspiração maiores do que para o tempo presente até o final do século XXI, com cenário RCP 8.5 exibindo os maiores valores.

A evapotranspiração potencial média observada entre 1961 e 2005 foi superior aos dados gerados por ambos os modelos no mesmo período para a região Sul de Minas Gerais. A variação percentual foi, porém, menor para o modelo Eta-HadGEM2-ES (-4,9% e -5,3% para ETp6 e ETp4, respectivamente). Para o modelo Eta-MIROC5, a variação foi de -21,4% (ETp6) e -19,2% (ETp4). Dessa maneira, o modelo Eta-HadGEM2-ES erra menos na modelagem do tempo presente.

Ainda para a região, observou-se que ambos os modelos e cenários apresentaram crescimento da evapotranspiração potencial ao longo do século XXI. Destaca-se a projeção simulada com base no cenário RCP 8.5 com o modelo Eta-HadGEM2-ES, na qual o crescimento em relação ao tempo presente foi de 55%. Ao longo do século, é possível observar que este modelo projetou uma taxa de crescimento da ETp6 de 1,7 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 6,8 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4 de 1,0 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 4,3 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5). O modelo Eta-MIROC5 projetou um crescimento da ETp6 de 0,5 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 1,1 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4 de 0,3 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 0,7 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5).

A região metropolitana de Belo Horizonte apresentou uma variação percentual superior aos 15% para ambos os modelos quando comparados os dados observados de 1961 a 2005 aos projetados pelos modelos. Para a evapotranspiração potencial simulada para os meses de outubro a dezembro e de dezembro a março a variação foi de -19,0% e -20,58%, respectivamente. Para o modelo Eta-MIROC5, as variações foram de -26,0% (ETp6) e -26,4% (ETp4).

As simulações para a região, considerando o cenário RCP 8.5 apresentam valores maiores do aquelas baseadas no cenário RCP 4.5, sendo que ambos apresentam valores médios superiores ao tempo presente. A taxa de crescimento da ETp6 ao longo do século, contudo, é consideravelmente inferior ao obtido para o sul de Minas Gerais, sendo de 1,3 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 3,9 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da mesma forma para ETp4, sendo de 0,75 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 2,48 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5). Com base nas projeções do modelo Eta-MIROC5, a ETp6 pode crescer a uma taxa muito inferior, de 0,4 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 1,1 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5), assim como a ETp4, de 0,2 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 0,6 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5).

A região metropolitana de São Paulo apresentou as maiores variações percentuais entre o tempo presente e o dados observados. Para o modelo Eta-HadGEM2-ES os valores de ETp6 e ETp4 foram -30,0% e -31,4%. Para o modelo Eta-MIROC5, a variação foi ainda maior com as projeções sendo -41,5% (ETp6) e -41,3% (ETp4)

O teste Mann-Kendall sugere que as projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES até o fim do século XXI para a RM-SP podem atingir um crescimento da ETp6 de 1,0 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 4,0 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5), enquanto que para a ETp4, uma taxa de crescimento de 0,9 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 2,7 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5). As projeções do modelo Eta-MIROC5 sugerem um crescimento da ETp6 de 0,4 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 0,8 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4 de 0,2 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 0,6 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5).

Para a RM-Campinas, as médias projetadas para o período de 1961-2005, diferenciam dos valores projetados para ambos os modelos. No modelo Eta-HadGEM2-ES os valores projetados foram -16,7% (ETp6) e -19,0% (ETp4), enquanto no modelo Eta-MIROC5, as diferenças foram de -33,8% (ETp6) e -33,5% (ETp4).

A taxa de aumento da ETp6 projetada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES até o fim do século XXI é de 2,2 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 8,5 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4, de 1,48 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 5,0 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5). As projeções do modelo Eta-MIROC5 para ETp6 aponta para uma taxa de crescimento de 0,6 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e de 1,3 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5), enquanto para ETp4, de 0,4 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 0,9 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5).

Para a região Centro-Leste de São Paulo, o modelo Eta-HadGEM2-ES se aproxima dos valores médios observados. A variação percentual foi de -214% (ETp6) e -6,5% (ETp4) para o modelo, enquanto que para o Eta-MIROC5 a variação percentual foi de -33,8% (ETp6) e -33,5% (ETp4).

A apresentou os maiores valores de evapotranspiração potencial simulados entre as 5 regiões estudadas do Sudeste. O modelo Eta-HadGEM2-ES projetou um crescimento da ETp6 de 2,4 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 9,8 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4 de 1,6 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 6,6 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5). Com as projeções do modelo Eta-MIROC5, pode haver um crescimento da ETp6 de 0,6 mm.semestre⁻¹ (RCP 4.5) e 1,5 mm.semestre⁻¹ (RCP 8.5) e da ETp4 de 0,4 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 4.5) e 1,0 mm.quadrimestre⁻¹ (RCP 8.5).

Como observado por Chou et al. (2014b), o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou valores de temperatura maiores que o modelo Eta-MIROC5 e, conseqüentemente, valores maiores de evapotranspiração potencial. Segundo os autores, os valores de temperatura projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES podem ser até duas vezes maior que aqueles projetados pelo modelo Eta-MIROC5, o que explica a diferença encontrada entre os dois modelos para ETp nesse estudo.

Tabela 3. Evapotranspiração Média simulada pelos modelo Eta-HadGEM2-ES para as regiões do sudeste do Brasil estudadas para o tempo presente e ao final do século XXI.

		Dados Observados (1961 -2005)		Baseline Eta-HadGEM2-ES (1961-2005)		Eta-HadGEM2-ES 4.5 (2007-2099)		Eta-HadGEM2-ES 8.5 (2007-2099)	
		ETp6	ETp4	ETp6	ETp4	ETp6	ETp4	ETp6	ETp4
Sul de Minas Gerais (Lavras)	Média	584,23	392,37	555,46	371,43	715,32	467,52	862,14	562,6
	Desvio	31,42	24,04	32,83	23,57	89,15	57,98	227,26	149,81
RM-BH	Média	618,14	422,57	500,95	335,64	604,71	399,77	672,56	444,95
	Desvio	37,92	26,13	23,39	17,94	54,65	35,51	124,09	81,2
RM-SP	Média	779,83	548,07	545,41	375,95	664,46	454,1	746,92	509,32
	Desvio	114,42	75,42	35,71	24,31	65,47	46,22	143,38	95,29
Região leste de SP (Piracicaba)	Média	677,80	474,52	661,82	443,87	899,2	599,45	1134,53	758,35
	Desvio	79,78	53,80	50,79	34,57	133,4	92,82	358,32	247,77
RM-Campinas	Média	756,42	524,56	629,85	424,71	838,59	561,96	1041,86	699,94
	Desvio	45,45	33,03	46,77	32,06	117,17	82,06	310,11	215,99

Tabela 4. Evapotranspiração Média simulada pelos modelo Eta-MIROC5 para as regiões do sudeste do Brasil estudadas para o tempo presente e ao final do século XXI.

		Dados Observados (1961 -2005)		Baseline Eta-HadGEM2-ES (1961-2005)		Eta-HadGEM2-ES 4.5 (2007-2099)		Eta-HadGEM2-ES 8.5 (2007-2099)	
		ETp6	ETp4	ETp6	ETp4	ETp6	ETp4	ETp6	ETp4
Sul de Minas Gerais (Lavras)	Média	584,23	392,37	459,52	316,9	499,07	342,3	524,92	354,21
	Desvio	31,42	24,04	13,58	9,89	27,61	16,44	49,92	28,06
RM-BH	Média	618,14	422,57	457,56	310,91	468,21	316,5	524,92	354,21
	Desvio	37,92	26,13	19,89	11,46	25,73	13,8	49,92	28,06
RM-SP	Média	779,83	548,07	455,92	321,84	486,78	343,02	504,53	351,91
	Desvio	114,42	75,42	14,91	13,21	21,8	16,61	34,61	23,99
Região leste de SP (Piracicaba)	Média	677,80	474,52	513,49	354,12	570,47	394,58	603,69	413,37
	Desvio	79,78	53,80	40,99	42,25	32,4	22,47	58,39	39,11
RM-Campinas	Média	756,42	524,56	500,8	348,8	547,28	379,81	576,54	396,13
	Desvio	45,45	33,03	17	13,81	29,35	20,42	34,81	52,13

3.3. Projeção do comportamento do SPI nas regiões estudadas no sudeste do Brasil ao longo do século XXI

3.3.1. Análise do comportamento dos modelos climáticos para projeção do SPI no tempo presente

Na figura 2 estão apresentados os comportamentos do SPI projetados para o tempo presente (1961 a 2005) para os períodos P6 (SPI6) e P4 (SPI4) (a. sul de MG; b. RM-BH; c.

RM-SP; d. Centro-Leste SP; e RM-Campinas). A região sul de Minas Gerais apresenta um papel importante para a geração de energia hidrelétrica para o sistema interligado do país, sendo Furnas o principal reservatório do Sudeste do Brasil. Constituem papel importante para esta região, as usinas de Camargos, Itutinga e do Funil, todas na calha do rio Grande. Uma sequência temporal de SPI negativos indica um período de seca prolongado, o que pode ser visualizado com base nas médias móveis de 5 anos (figura 2). A figura 2a apresenta o comportamento do SPI projetado pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o tempo presente. Observa-se que ambos os modelos não projetaram uma quantidade significativa de eventos de seca no período de 44 anos de dados simulados, sendo que o modelo Eta-HadGEM2 projeta um evento SPI6 “excepcionalmente seco” (1978/1979 com -2,6) e um evento SPI4 (1978/1979 com -2,37) e o modelo Eta-MIROC5 não apresenta nenhum evento “excepcionalmente seco”.

Observa-se uma diferença, entretanto, na quantidade de eventos de seca consecutivos. Para o modelo Eta-HadGEM2-ES, observou-se um período prolongado de seca simulado nas décadas de 1960 e 1970 seguido por décadas com períodos úmidos. No modelo Eta-MIROC5, observa-se uma alternância maior entre eventos de seca e eventos úmidos, que se aproximam mais da realidade observada por Silva e Mello (2018).

Para a RM-BH, o modelo Eta-HadGEM2-ES projetou somente o ano hidrológico 1978/1979 como “excepcionalmente seco” (SPI6 de -2,47 e SPI4 de -2,85) e comportamento caracterizado por uma sequência de anos secos na década de 1960 e 1970. Contudo, as projeções do modelo Eta-MIROC5 simularam eventos “excepcionalmente secos” em 1988/1989 (SPI6 de -2,11 e SPI4 de -2,01) e, diferentemente do modelo Eta-HadGEM2-ES, a maior presença de valores negativos nas décadas de 1980 e 1990.

O modelo Eta-HadGEM2-ES projetou 3 eventos “excepcionalmente secos” com base no SPI6 (1972/1973 com -2,74; 1976/1977 com -2,17; e 1978/1979 com -2,70) e 2 eventos com base no SPI4 (1972/1973 com -2,59 e 1978/1979 com -2,53) para a RM-SP (figura 2c). Essa frequência de eventos excepcionalmente secos difere do que foi encontrado para as regiões Sul de Minas Gerais e RM-BH, para as quais apenas um evento foi simulado. Com base no modelo Eta-MIROC5, observou-se dois eventos “excepcionalmente secos” (1963/1964 com SPI6 igual a -3,08 e 2001/2002 igual a -2,90; e 1963/1964 com SPI4 igual a -3,11 e 2001/2002 igual a -2,40). Com base na média móvel gerado para as projeções do modelo Eta-MIROC5, observa-se que os valores de SPI oscilam entre positivos e negativos,

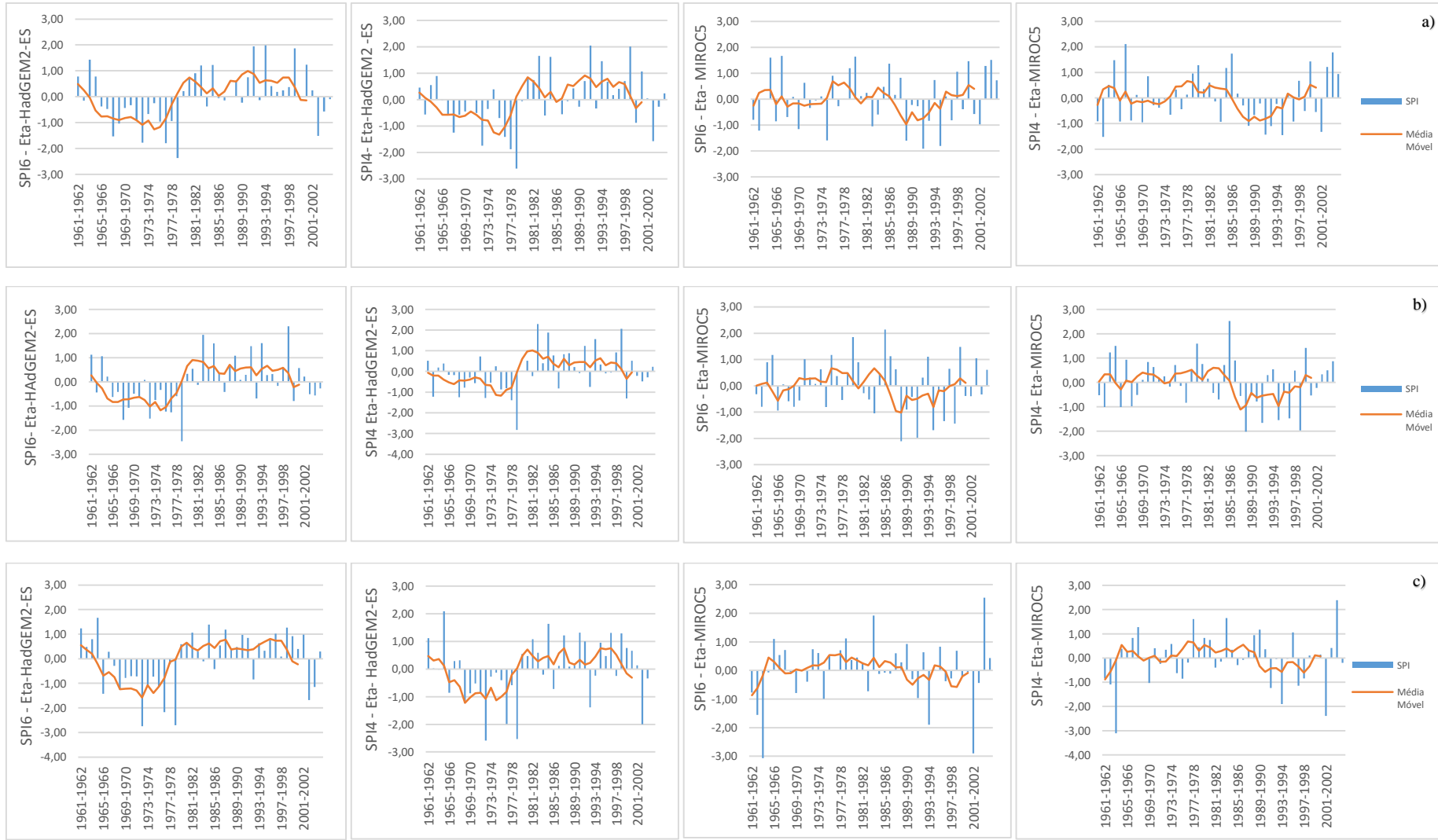
o que indica uma alternância de anos hidrológicos secos e úmidos, mas não um período extenso com anos secos.

Ainda para a RM-SP, observa-se que o modelo Eta-HadGEM2-ES simulou dois eventos “excepcionalmente secos” com base tanto no SPI6 quanto SPI4. O ano hidrológico 1974/1975 apresentou SPI4 simulado igual a -2,5 e SPI6 igual a -2,19, enquanto o ano 1983/1984, -2,45 e -2,15, respectivamente. O modelo Eta-MIROC5 simulou dois eventos “excepcionalmente secos” com base no SPI4 (1963/1964 com -2,19 e 2001/2002 com -2,28) e com base no SPI6, um evento com esta magnitude (2001/2002 com -2,30).

Para a RM-Campinas observou-se o mesmo comportamento dos modelos, com o Eta-HadGEM2-ES simulando dois eventos “excepcionalmente secos” com base no SPI6 (1972/1973, -2,38; 1978/1979, -2,18) e um evento “excepcionalmente seco” com base no SPI4 (1978/1979 de -2,04). O modelo Eta-MIROC5, por sua vez, simulou um evento “excepcionalmente seco” para o período chuvoso de 2001/2002 (SPI6 = -2,31) e dois outros, em 1963/1964 (SPI 4 = -2,18) e 2001/2002 (SPI4 = -2,28) para o verão.

Analisando a figura 2 e as tabelas 5 e 6, observa-se que o comportamento da simulação para o período chuvoso (outubro – março) e para o verão (dezembro – março) são semelhantes, com a mesma quantidade de eventos severos. Contudo, entre os modelos observa-se uma diferença pronunciada no comportamento dos anos de seca. O modelo Eta-HadGEM2-ES tende a agrupar os eventos de seca em anos consecutivos, enquanto o modelo Eta-MIROC5, projeta uma maior oscilação dos eventos, semelhando ao comportamento observado no período controle. A quantidade de eventos ‘excepcionalmente secos’ é maior nas regiões estudadas do estado de São Paulo.

Pela figura 3 observa-se o comportamento dos episódios de seca nas regiões estratégicas do Sul de Minas. Pelo comportamento da média móvel, observa-se que o modelo Eta-MIROC5 tende a projetar um comportamento mais semelhante, com os valores observados, tanto de SPI6, quanto de SPI4. O modelo Eta-MIROC5 apresenta um comportamento oscilatório do SPI, enquanto no modelo Eta-HadGEM2-ES há uma concentração dos episódios de seca em blocos. Esse efeito dificilmente é observado nos dados obtidos das estações meteorológicas.



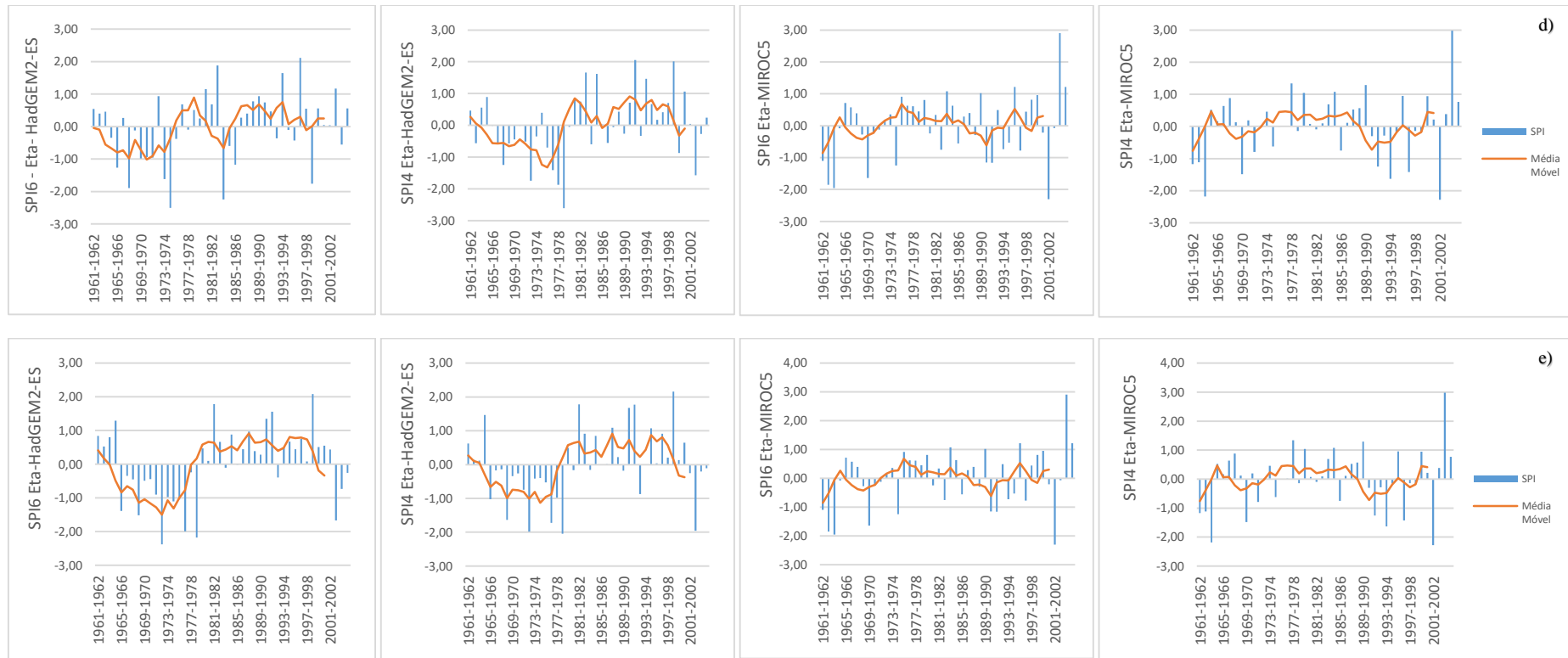
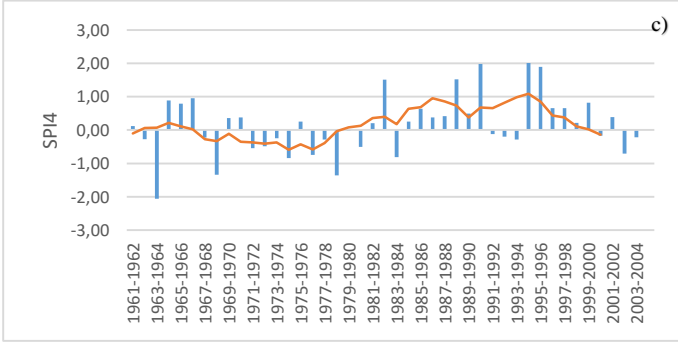
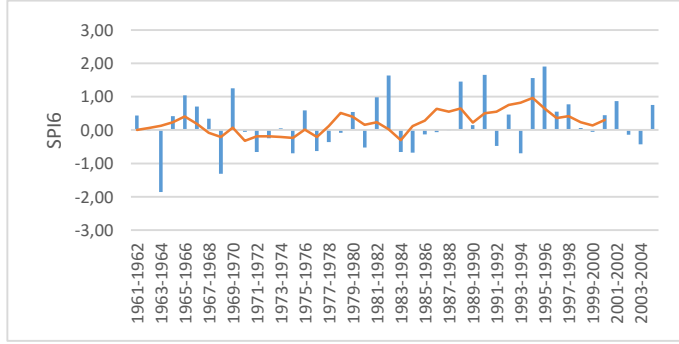
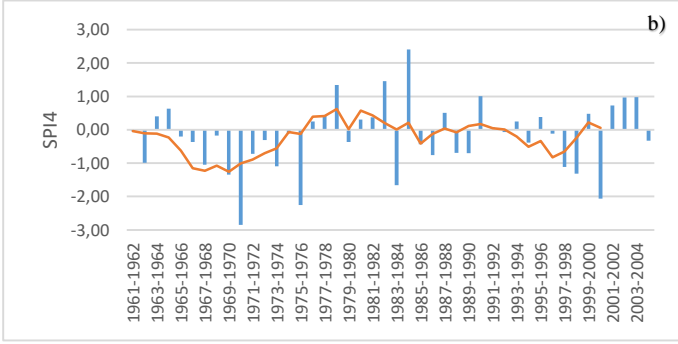
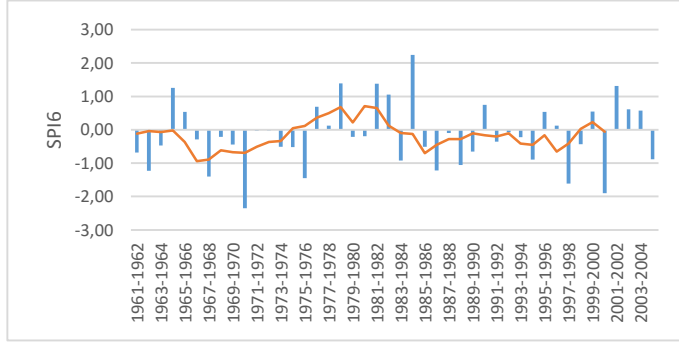
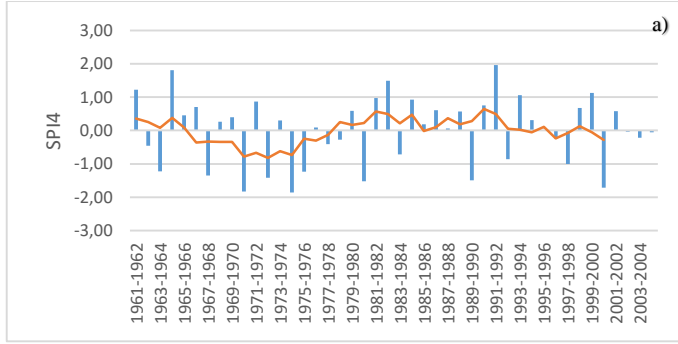
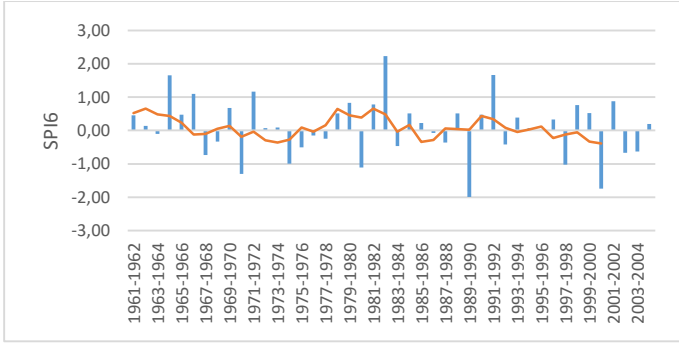


Figura 2. Comportamento do SPI6 e do SPI4 para as regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o tempo presente (1961 – 2005).



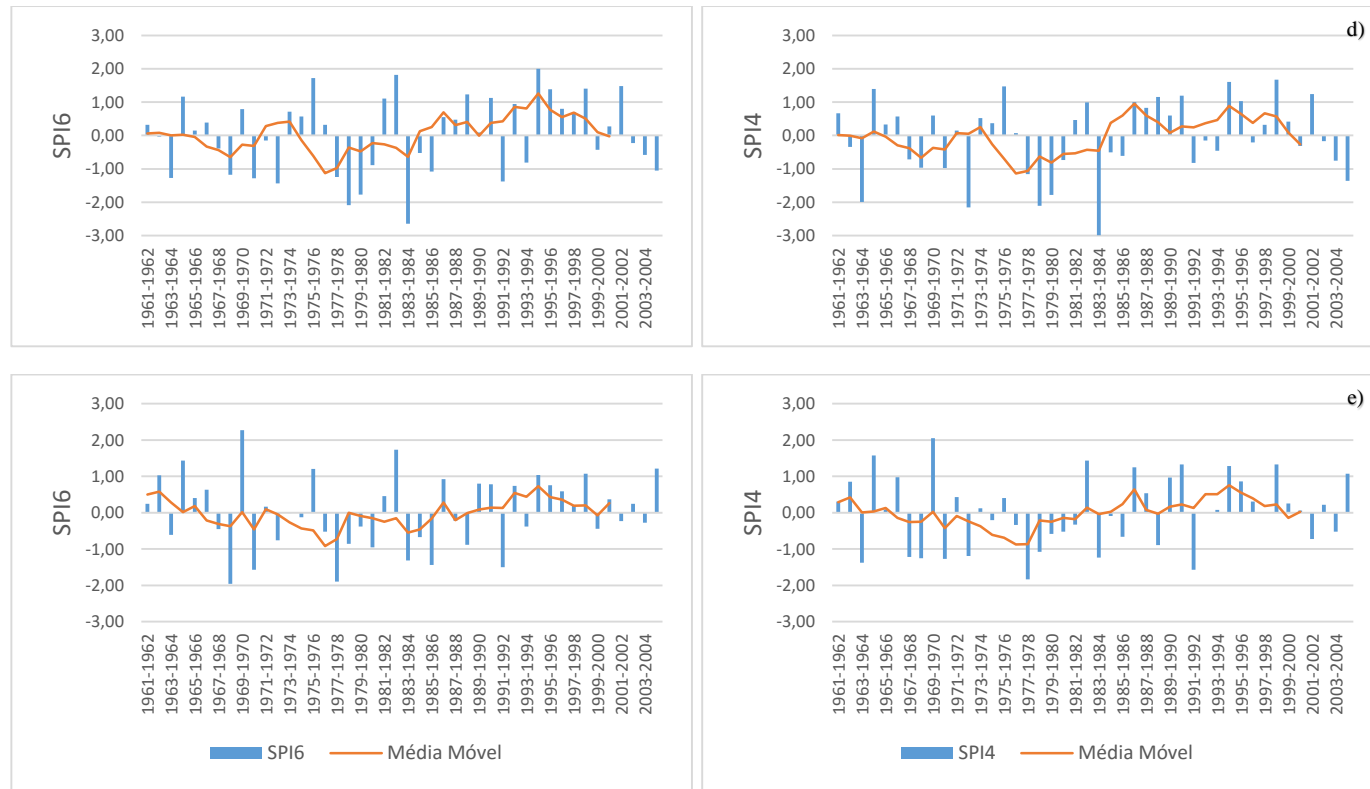


Figura 3. Comportamento do SPI6 e do SPI4 para as regiões estratégicas do Sudeste do Brasil observado de 1961 – 2005. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 3. Frequência de ocorrência de eventos de seca simulados pelo modelo Eta-MIROC5 de 1961-2005 para as regiões estudadas no Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4.

		Anormalmente Seco	Moderadamente Seco	Muito Seco	Severamente Seco	Excepcionalmente Seco	Total
Sul de MG (Lavras)	SPI6 Eta-HadGEM2-ES	2	4	2	2	1	11
	SPI4 Eta-HadGEM2-ES	6	2	2	2	1	13
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	1	4	4	3	0	12
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	3	4	0	2	0	9
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPI6 Eta-HadGEM2-ES	8	3	2	0	1	14
	SPI4 Eta-HadGEM2-ES	4	6	2	0	1	13
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	4	4	2	1	3	14
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	3	6	2	2	1	14
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPI6 Eta-HadGEM2-ES	4	5	1	1	3	14
	SPI4 Eta-HadGEM2-ES	3	4	1	2	2	12
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	2	2	2	0	1	7
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	7	0	1	1	0	9
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPI6 Eta-HadGEM2-ES	2	5	0	3	2	12
	SPI4 Eta-HadGEM2-ES	1	4	0	2	3	10
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	4	4	1	2	3	14
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	2	8	2	1	2	15
RM Campinas (IAC)	SPI6 Eta-HadGEM2-ES	1	4	2	2	2	11
	SPI4 Eta-HadGEM2-ES	2	3	0	4	1	10
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	5	7	2	1	0	15
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	4	3	4	2	0	13

Tabela 4. Frequência de ocorrência de eventos de seca simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES de 1961-2005 para as regiões estudadas do Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4.

		Anormalmente Seco	Moderadamente Seco	Muito Seco	Severamente Seco	Excepcionalmente Seco	Total
Sul de MG (Lavras)	SPI6 Eta-MIROC5	4	7	2	2	0	15
	SPI4 Eta-MIROC5	3	8	4	0	0	15
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	1	4	4	3	0	12
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	3	4	0	2	0	9
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPI6 Eta-MIROC5	4	6	2	2	1	15
	SPI4 Eta-MIROC5	7	4	2	2	1	16
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	4	4	2	1	3	14
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	3	6	2	2	1	14
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPI6 Eta-MIROC5	3	2	1	1	2	9
	SPI4 Eta-MIROC5	1	7	0	1	2	11
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	2	2	2	0	1	7
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	7	0	1	1	0	9
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPI6 Eta-MIROC5	5	4	0	3	1	13
	SPI4 Eta-MIROC5	3	3	2	1	2	11
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	4	4	1	2	3	14
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	2	8	2	1	2	15
RM Campinas (IAC)	SPI6 Eta-MIROC5	5	4	0	3	1	13
	SPI4 Eta-MIROC5	3	3	2	1	2	11
	Dados Observados SPI4 (1961-2005)	5	7	2	1	0	15
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	4	3	4	2	0	13

3.3.2. Análise das projeções segundo o modelo Eta-HadGEM2-ES

A figura 4a apresenta o comportamento do SPI projetado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES tendo-se as premissas dos cenários 4.5 e 8.5 para a região sul de Minas Gerais. Observa-se que o RCP4.5 simulou 2 eventos SPI6 “excepcionalmente secos” nos anos de 2015/2016 e 2016/2017 com valores de -2,04 e -2,26, respectivamente. Esses valores foram simulados próximos aos de 2013/2014 e 2014/2015, anos que apresentaram SPI6 observados iguais a -2,56 e -1,96 e foram os mais secos já registrados na região sul de Minas Gerais. Encontrou-se apenas um valor ‘excepcionalmente seco” projetado com base no SPI4, no ano de 2066/2067 com valor de -2,07. Observa-se, ainda que o RCP 4.5 concentra os valores negativos na década de 2010 e 2020 e 2050 e 2060, o que pode indicar diversos anos de seca prolongada no futuro. Para o cenário 8.5, observa-se que o SPI6 projetou apenas um evento “excepcionalmente seco”, com valor de -2,75 para o ano de 2022/2023, menor do que o encontrado com base no RCP4.5 para o ano de 2016/2017. Usando o SPI4, o mesmo ano representou o único evento “excepcionalmente seco” observado, com valor de -2,75. O comportamento do RCP8.5 difere ligeiramente do projeto pelo modelo com base no RCP4.5. A principal concentração de valores de seca foram projetados pelo modelo HadGEM2-ES para o fim do século XXI, devido ao contínuo aumento das emissões de gases do efeito estufa incluídas no modelo, especialmente nas condições do cenário RCP8.5 (CHOU et al., 2014a).

Para a RM-BH, o comportamento do SPI6 e SPI4 projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES estão apresentados na figura 4b. Observou-se 2 eventos “excepcionalmente secos” com base em ambos os indicadores sob as condições do cenário 4.5. Para essa condição, este modelo simula esses eventos com base no SPI6 para os anos de 2016/2017 (-2,21) e 2083/2084 (-2,06), enquanto que com base no SPI4, esses eventos foram simulados para os anos de 2066/2067 (-2,16) e 2083/2084 (-2,12). O comportamento das projeções de SPI4 e SPI6 pelo modelo Had-GEM2-ES são caracterizados por blocos, ou seja, pela presença de anos secos consecutivos, situação essa muito mais complexa do ponto de vista de disponibilidade de recursos hídricos do que para as condições que vem sendo observadas atualmente, com oscilação entre os anos.

Com base no cenário RCP8.5 e modelo HadGEM2-ES, para a RM-BH, há uma redução do número de eventos “excepcionalmente secos”, tanto aplicando o SPI4 quanto o SPI6, em relação ao cenário 4.5. Contudo, um evento com essa magnitude poderá ocorrer no

ano de 2022/2023 ($SPI6 = -2,93$; $SPI4 = -2,87$). Pela tabela 5 observa-se que há uma redução do número de eventos “excepcionalmente secos” do cenário 4.5 para o 8.5, porém, há um aumento do número de eventos “severamente secos” para o verão ($SPI4$) (de 2 para 5 eventos). Nota-se ainda que há uma redução do número total de eventos de seca do RCP 4.5 para o 8.5.

Na RM-SP (figura 4c) foram projetados dois eventos “excepcionalmente secos” para o período chuvoso e um evento no verão considerando o cenário 4.5 e o modelo Eta-HadGEM2-ES. Aplicando o $SPI6$, as simulações apontaram um evento com valor desse índice igual a $-2,04$ em 2015/2016 e outro, igual a $-2,63$ em 2083/2084. Aplicando o $SPI4$, foi projetado um evento “excepcionalmente seco” em 2083/2084 ($SPI4 = -2,62$).

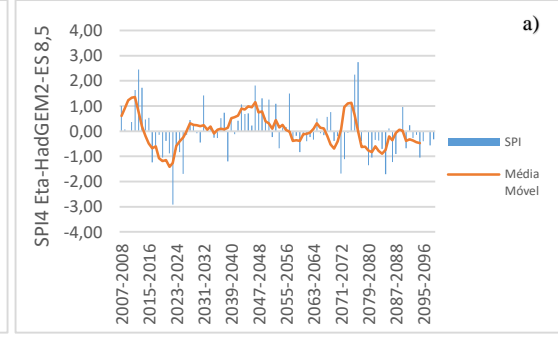
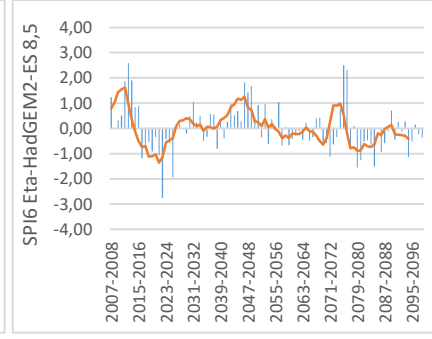
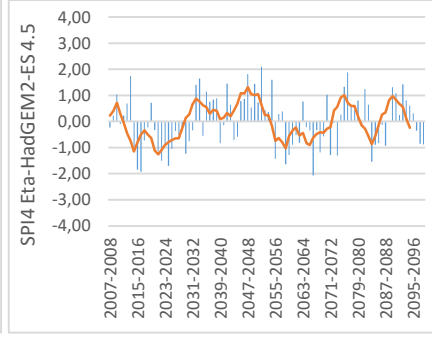
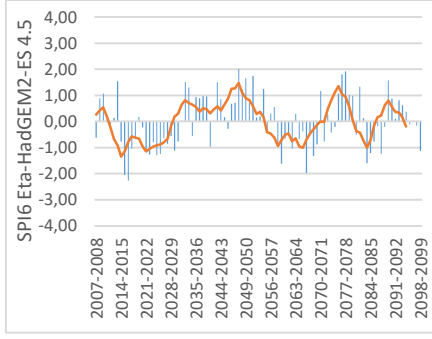
Para o cenário 8.5, foram projetados pelo modelo HadGEM2-ES eventos “excepcionalmente secos”, tanto para o período chuvoso quanto para o verão, em 2022/2023 ($SPI6 = -2,24$; $SPI4 = 2,20$) e 2079/2080 ($SPI6 = -2,67$; $SPI4 = -2,49$). A principal diferença entre os cenários pode ser observada ao final do século XXI, uma vez que o modelo simula o cenário 8.5 com aumento das concentrações de gases do efeito estufa continuamente até o fim do século, assim, eventos de seca poderão ser mais recorrentes nesse cenário do que no cenário 4.5 (CHOU et al., 2014b).

A região centro-leste (figura 4d) apresentou em 2015/2016 o único evento “extremamente seco” para o período chuvoso ($SPI6 = -2,22$) e para o verão ($SPI4 = -2,18$), para as condições do cenário 4.5 com o modelo Eta-HadGEM2-ES. Para o cenário 8.5, no entanto, o único evento “extremamente seco” foi projetado para 2079-2080 com $SPI6 = -2,48$ e $SPI4 = -2,05$. Para essa região observa-se também aumento da frequência de ocorrência destes eventos de seca no final do século XXI, do cenário RCP 4.5 para o cenário RCP 8.5.

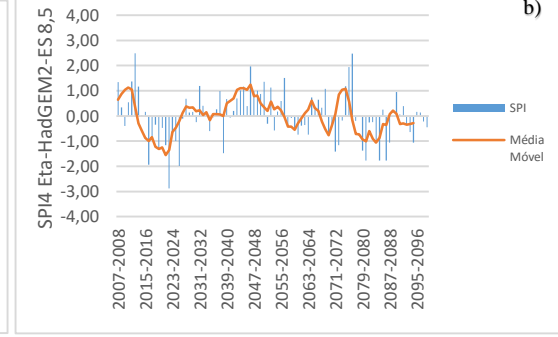
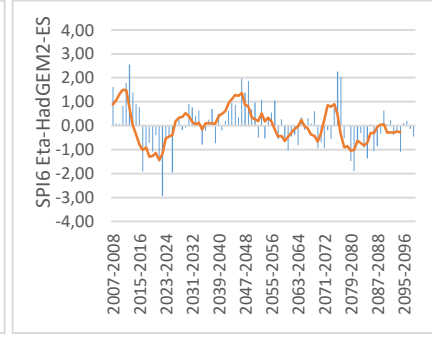
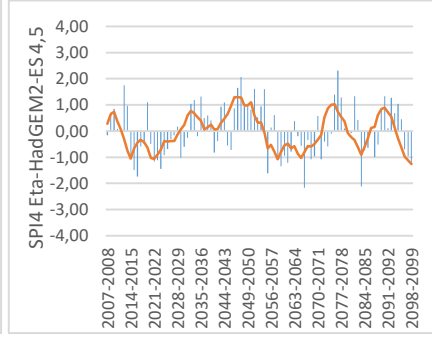
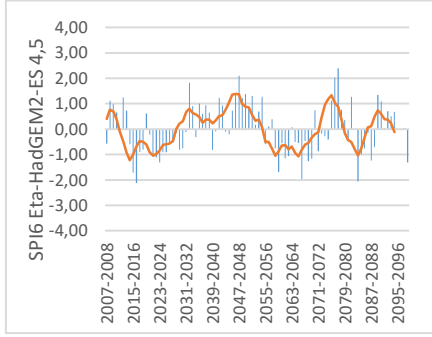
Para a RM-Campinas (figura 4e) nenhum evento “excepcionalmente seco” para o verão com base no RCP4.5 e modelo Eta-HadGEM2-ES foi projetado. Entretanto, para o período chuvoso de 6 meses, foi projetado um evento “excepcionalmente seco” para o ano 2015/2016, com $SPI6 = -2,03$. Contudo, para o cenário 8.5, ambos os períodos apresentaram um evento “excepcionalmente seco”, com $SPI6 = -2,40$ e $SPI4 = -2,04$ para o ano hidrológico 2079/2080.

De maneira geral, observa-se que o cenário 8.5 tende a simular valores mais negativos para os índices ao final do século XXI. Para as regiões do estado de São Paulo foi

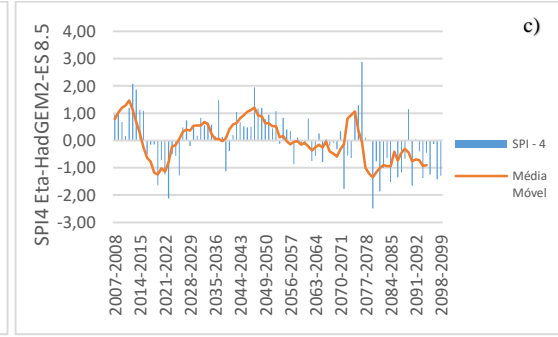
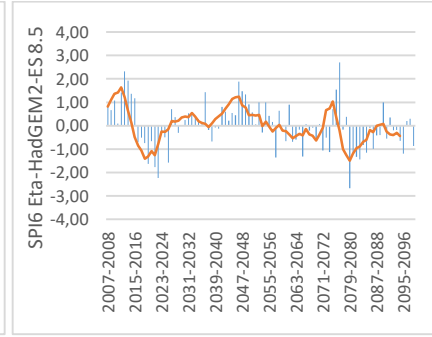
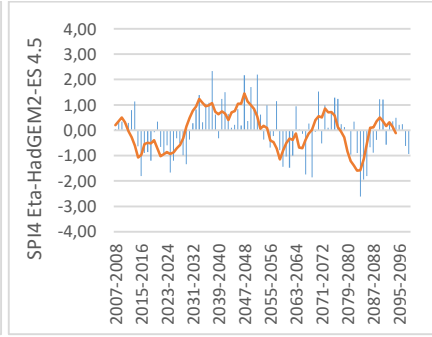
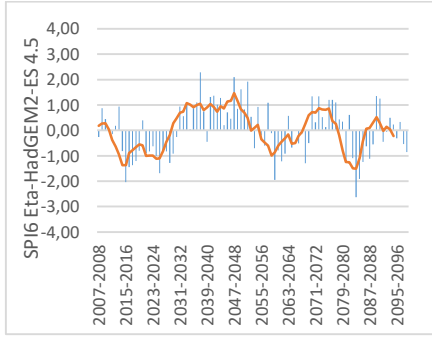
projetado um evento muito negativo para o ano de 2079/2080 considerando o cenário 8.5. Chou et al., (2014a) apontam para uma redução da precipitação projetada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, porém, não se observa um aumento dos eventos “excepcionalmente secos” quando comparado ao tempo presente. Observa-se, no entanto, que o padrão de agrupar eventos de seca de forma seguida parece se manter em ambos os cenários até o fim do século XXI, aplicando-se o modelo HadGEM2-ES. A presença de vários anos consecutivos de seca, como apontados por esse modelo, pode implicar em efeitos catastróficos para a população, o abastecimento de água, a produção de energia e a produção de alimentos.



a)



b)



c)

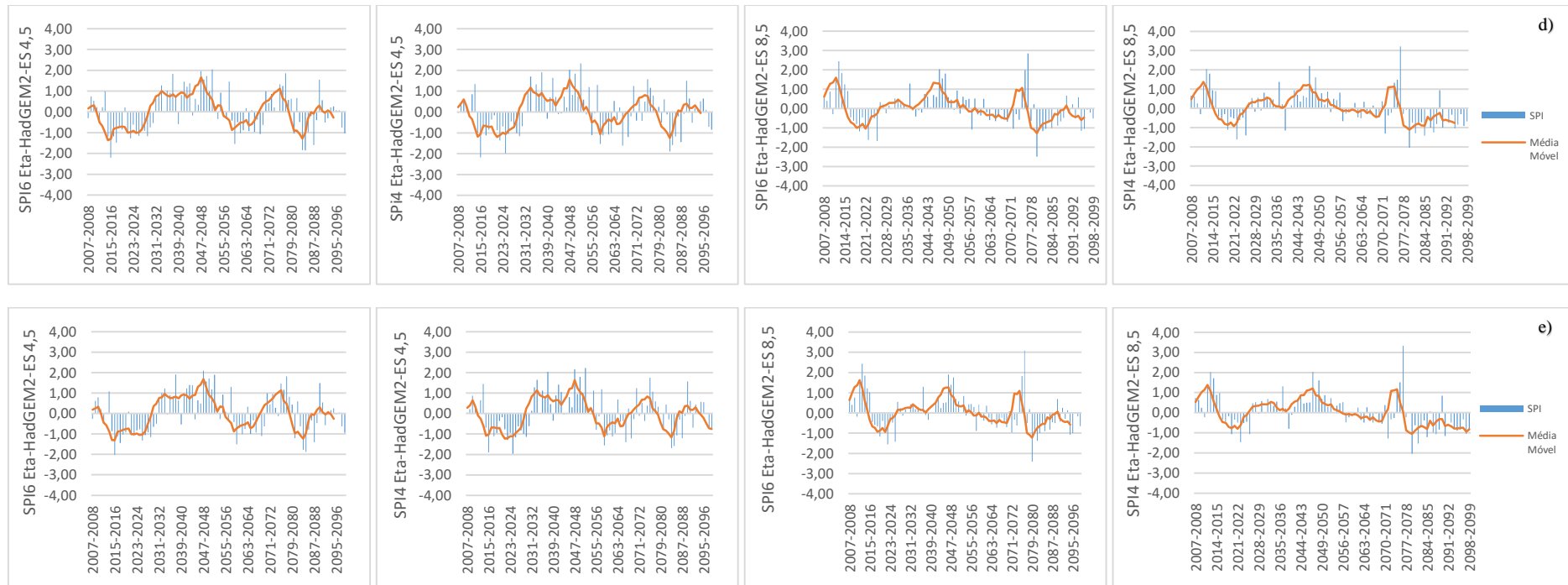


Figura 4. Projeções do SPI referentes aos períodos chuvosos de 6 meses (SPI6) e de 4 meses (SPI4) para regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 5. Frequência de ocorrência de eventos de seca observados de 2007-2009 para as regiões do centro-sul do Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4.

	Classificação	AS	ModS	MS	SS	ES	Total
Sul de MG (Lavras)	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	14 1 evento/6,6 anos	14 1 evento/6,6 anos	1 1 evento/92 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	34
	SPI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	8 1 evento/11,5 anos	16 1 evento/5,8 anos	4 1 evento/23 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	33
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	14 1 evento/6,6 anos	8 1 evento/11,5 anos	2 1 evento/46 anos	1 1 evento/92 anos	1 1 evento/92 anos	26
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	6 1 evento/15,3 anos	11 1 evento/8,4 anos	1 1 evento/92 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	22
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	11 1 evento/8,4 anos	15 1 evento/6,1 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	33
	SPI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	12 1 evento/7,7 anos	15 1 evento/6,1 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	34
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	10 1 evento/9,2 anos	10 1 evento/9,2 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	27
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	8 1 evento/11,5 anos	8 1 evento/11,5 anos	3 1 evento/30,7 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	25
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	9 1 evento/10,2 anos	18 1 evento/5,1 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	33
	SPI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	9 1 evento/10,2 anos	12 1 evento/7,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	32
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	11 1 evento/8,4 anos	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	28
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	10 1 evento/9,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	4 1 evento/23 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	28
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	7 1 evento/13,1 anos	14 1 evento/6,6 anos	4 1 evento/23 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	29
	SPI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	11 1 evento/8,4 anos	15 1 evento/6,1 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	33
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	9 1 evento/10,2 anos	10 1 evento/9,2 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	1 1 evento/92 anos	24
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	10 1 evento/9,2 anos	10 1 evento/9,2 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	27

RM Campinas (IAC)	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	10 1 evento/9,2 anos	16 1 evento/5,8 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	1 1 evento/92 anos	33
	SPI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	9 1 evento/10,2 anos	16 1 evento/5,8 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	0 1 evento/- anos	31
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	7 1 evento/13,1 anos	10 1 evento/9,2 anos	3 1 evento/30,7 anos	0 1 evento/- anos	1 1 evento/92 anos	21
	SPI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	5 1 evento/18,4 anos	13 1 evento/7,1 anos	2 1 evento/46 anos	0 1 evento/- anos	1 1 evento/92 anos	21

3.3.3. Análise das projeções segundo o modelo Eta-MIROC5

Com base nas projeções do modelo Eta-MIROC5 para a região Sul de Minas Gerais (Figura 5a), 2 eventos “excepcionalmente secos” foram simulados para o RCP4.5, considerando o período úmido de seis meses (2033/2034, SPI6 = -2,48; 2098/2099, SPI6 = -3,17). Três eventos “excepcionalmente secos” foram projetados pelo modelo com base no RCP8.5 (2033/2034, SPI6 = -2,39; 2067/2068, SPI6 = -2,15; e 2098/2099, SPI6 = -3,6). Com base no RCP8.5, não foi observado na simulação nenhum valor menor que -2.

Para a RM-BH foram simuladas uma maior quantidade de eventos de seca considerando o cenário RCP 4.5 do que para a região sul de Minas Gerais (figura 5b). Para o período chuvoso de 6 meses foram projetados 4 eventos “excepcionalmente secos”: 2028/2029 (-2,68), 2033/2034 (-2,09), 2067/2068 (-2,72) e 2098/2099 (-3,21). Para o período chuvoso de verão (ou 4 meses) foram projetados 3 eventos: 2028/2029 (-2,74), 2067/2068 (-2,43) e 2098/2099 (-2,87). Com base no cenário 8.5, apenas 1 evento “excepcionalmente seco” foi projetado para o período chuvoso de 6 meses: 2025/2026 (-2,08). Para o período chuvoso de 4 meses (verão), três eventos “excepcionalmente secos” foram projetados: 2033/2034 (-2,58), 2036/2037 (-2,00) e 2063/2064 (-2,26).

Para a RM-SP (figura 5c), foi projetado apenas um evento “excepcionalmente seco” para o período chuvoso de 6 meses, considerando o RCP4.5 e o modelo MIROC5 (2057/2058, SPI6 = -2,00) e dois para o período chuvoso de 4 meses (2009/2010, SPI4 = -2,65; 2029/2030, SPI4 = -2,08). Considerando o RCP8.5, há uma tendência crescente dos valores de SPI até o final do século, significando ausência de períodos de seca significativa, principalmente a partir da década de 2090. Contudo, foram projetados dois eventos “excepcionalmente secos” para o período chuvoso de 6 meses (2035/2036, SPI6 = -2,3;

2056/2057, $SPI6 = -2,41$), e para o período chuvoso de 4 meses, um evento (2056/2057, $SPI4 = -3,33$). Diferentemente do modelo Eta-HadGEM2-ES, em que a maioria dos eventos extremos de seca foram projetados para os mesmos anos hidrológicos (período chuvoso de 6 meses e período chuvoso de 4 meses), o modelo Eta-MIROC5 tende a concentrar a precipitação anual nos períodos chuvosos, mantendo o padrão de precipitação do clima presente, enquanto tende a intensificar a seca em outros períodos (CHOU et al., 2014b). Esse comportamento ajuda a explicar a diferença de valores de $SPI4$ e $SPI6$, como observado para o RCP8.5, em que há uma diferença de 6 eventos de seca simulados entre os períodos estudados (Figura 5c).

Essa diferença entre $SPI4$ e $SPI6$ fica evidente quando se analisa as projeções do modelo MIROC5 nas condições do cenário 4.5 para a região centro-leste (figura 5d). Aplicando o $SPI6$, não foi observado nenhum evento “excepcionalmente seco”, enquanto que com base no $SPI4$, foram simulados três eventos: 2009/2010 ($-2,38$), 2094/2095 ($-2,11$) e 2098/2099 ($-2,67$). Assim como a RM-SP, observa-se a presença de tendência no crescimento da precipitação, o que diminui a ocorrência de eventos de seca a partir da década de 2060. Foram projetados um evento “excepcionalmente seco” para o período chuvoso de 6 meses em 2035/3036 ($SPI6 = -2,08$) e em 2056/2057 ($SPI6 = -2,90$).

A RM-Campinas não apresentou nenhum evento “excepcionalmente seco” para o período chuvoso de 6 meses considerando o cenário 4.5 simulado com o modelo Eta-MIROC5. Para o período chuvoso de 4 meses, entretanto, foram observados 4 eventos nessa categoria: 2009/2010 ($SPI4 = -2,46$), 2034/2035 ($SPI4 = -2,13$), 2094/2095 ($SPI4 = -2,18$) e 2098/2099 ($SPI4 = -2,59$). Para o cenário RCP 8.5 dois eventos “excepcionalmente secos” foram observados para o período chuvoso de 6 meses: 2035/2036 ($SPI6 = -2,18$) e 2056/2057 ($SPI6 = -2,38$) e um para o período chuvoso de 4 meses: 2056/2057 ($SPI4 = -2,81$).

Observou-se que as projeções do modelo Eta-MIROC5 apontam anos “excepcionalmente secos” diferentes para $SPI4$ e $SPI6$. A concentração de chuvas simuladas pelo modelo explica essa diferença. Quando comparados os eventos mais extremos, tanto com base no RCP4.5 quanto no RCP8.5, ao tempo presente, nota-se que não há tendência de aumento de eventos extremos no passado, como apresentado na tabela 6

A presença de diversos anos de seca pode impactar a produção de energia hidrelétrica na região sul de Minas Gerais, bem como a produção de café, ambos fundamentais para a economia do estado. Poderão ainda ser afetadas todas as regiões metropolitanas do estudo,

levando novamente a uma crise hídrica semelhante ou ainda mais severa do que foi observado entre 2013 e 2015 dada a quantidade de anos hidrológicos consecutivamente secos.

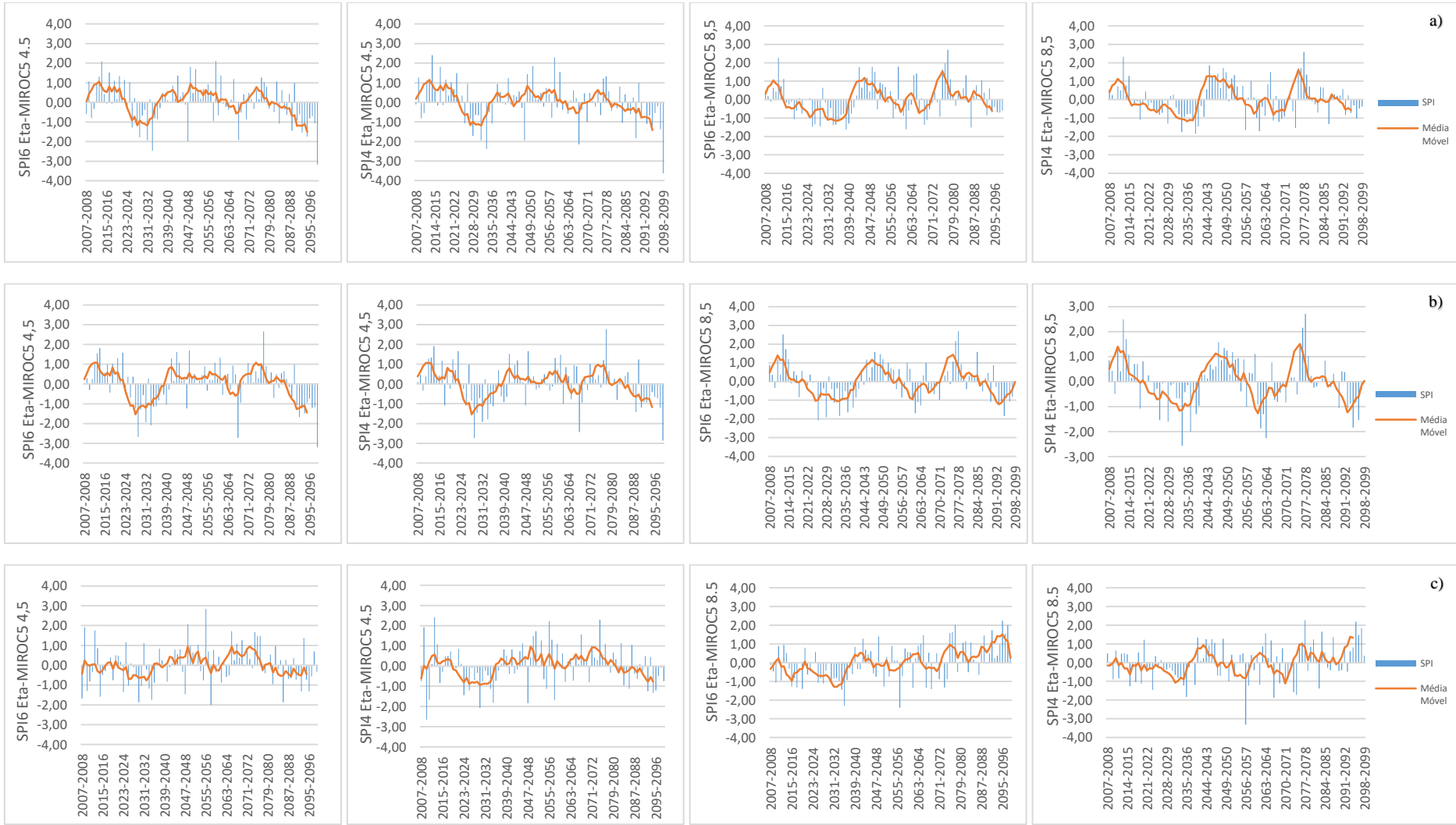




Figura 5. Projeções do SPI referentes aos períodos chuvosos de 6 meses (SPI6) e de 4 meses (SPI4) para regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelo modelo Eta-MIROC5 (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 6. Frequência de ocorrência de eventos de seca observados de 2007-2009 para as regiões do centro-sul do Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4 pelo Eta-MIROC5.

	Classificação	AS	ModS	MS	SS	ES	Total
Sul de MG (Lavras)	SPI6 Eta- MIROC5 4,5	7 1 evento/13,1 anos	12 1 evento/7,7 anos	2 1 evento/46 anos	5 1 evento/18,4 anos	2 1 evento/46 anos	28
	SPI4 Eta- MIROC5 4,5	10 1 evento/9,2 anos	7 1 evento/13,1 anos	2 1 evento/46 anos	4 1 evento/23 anos	3 1 evento/30,7 anos	26
	SPI6 Eta- MIROC5 8,5	12 1 evento/7,7 anos	9 1 evento/10,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	2 1 evento/46 anos	0 1 evento/- anos	31
	SPI4 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	14 1 evento/6,6 anos	4 1 evento/23 anos	4 1 evento/23 anos	0 -	30
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPI6 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	12 1 evento/7,7 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	4 1 evento/23 anos	28
	SPI4 Eta- MIROC5 4,5	7 1 evento/13,1 anos	15 1 evento/6,1 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	29
	SPI6 Eta- MIROC5 8,5	4 1 evento/23 anos	16 1 evento/5,8 anos	1 1 evento/92 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	27
	SPI4 Eta- MIROC5 8,5	6 1 evento/15,3 anos	10 1 evento/9,2 anos	5 1 evento/18,4 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	26
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPI6 Eta- MIROC5 4,5	10 1 evento/9,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	6 1 evento/15,3 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	29
	SPI4 Eta- MIROC5 4,5	11 1 evento/8,4 anos	8 1 evento/11,5 anos	2 1 evento/46 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	27
	SPI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	15 1 evento/6,1 anos	7 1 evento/13,1 anos	0 -	2 1 evento/46 anos	32
	SPI4 Eta- MIROC5 8,5	4 1 evento/23 anos	15 1 evento/6,1 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	26
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPI6 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	15 1 evento/6,1 anos	2 1 evento/46 anos	5 1 evento/18,4 anos	0 -	30
	SPI4 Eta- MIROC5 4,5	9 1 evento/10,2 anos	10 1 evento/9,2 anos	4 1 evento/23 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	29
	SPI6 Eta- MIROC5 8,5	7 1 evento/13,1 anos	14 1 evento/6,6 anos	4 1 evento/23 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	29
	SPI4 Eta- MIROC5 8,5	10 1 evento/9,2 anos	13 1 evento/7,1 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	30

RM Campinas (IAC)	SPI6 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	9 1 evento/10,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	3 1 evento/30,7 anos	0 -	28
	SPI4 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	11 1 evento/8,4 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	4 1 evento/23 anos	28
	SPI6 Eta- MIROC5 8,5	6 1 evento/15,3 anos	14 1 evento/6,6 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	2 1 evento/46 anos	28
	SPI46 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	16 1 evento/5,8 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	1 1 evento/92 anos	30

3.4. Projeção do comportamento do SPEI nas regiões estudadas no sudeste do Brasil ao longo do século XXI

3.4.1. Análise do comportamento dos modelos climáticos para projeção do SPEI no tempo presente

A evapotranspiração pode influenciar diretamente o nível de represas e reservatórios. Dessa maneira o SPEI funciona como ferramenta para interpretação do impacto desse fenômeno meteorológico em uma região. Na figura 6 estão representados o comportamento do SPEI para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para o tempo presente e a figura 7 apresenta o comportamento observado do SPEI de 1961 a 2005 para as regiões estratégicas do Sul de Minas

A figura 6a apresenta o comportado do SPEI simulado para a região sul de Minas Gerais. Para o modelo Eta-HadGEM2-ES, o SPEI6 e o SPEI4 projetaram apenas um evento “excepcionalmente seco” em 1978/1979 (-2,32 e -2.42, respectivamente). Comparado ao baseline projetado pelo SPI, observa-se um comportamento semelhante (figura 2a), em que os valores mais secos estão concentrados no começo dos dados observados e em blocos. Notou-se, ainda, que o ano de 1978/1979 apresentou valores extremos projetados para os dois índices.

Para o Modelo Eta-MIROC5 não foram observados nenhum evento extremo, tanto para o período chuvoso, quanto para o período de verão. Pelas tabelas 7 e 8, observa-se que o número de eventos secos menos intensos são maiores no modelo Eta-MIROC do que no Eta-HadGEM2-ES. Observa-se, ainda, que os valores de SPEI aumentam no fim do tempo presente, enquanto tendem a diminuir no modelo Eta-HasGEM2-ES (figura 6a).

Entre 1961 e 2005 não foram observados nenhum evento “excepcionalmente seco” na região sul de Minas Gerais (Figura 7 e tabelas 7 e 8). O modelo Eta-MIROC5 não apresenta o comportamento em blocos que o modelo Eta-HadGEM2-ES projeta. Dessa maneira esse modelo tende a se aproximar mais do observado, errando menos nas simulações dos episódios de seca.

A RM-BH (figura 6b) apresenta comportamento semelhante a região sul de Minas Gerais. O ano de 1978/1979 foi o mais seco registrado pela simulação para os períodos de outubro a março e dezembro a março para o modelo Eta-HadGEM2-ES (SPEI6 = -2,65 e SPEI4 = -2,85, respectivamente). Para o modelo Eta-MIROC5, foi observado 1 evento “excepcionalmente seco” em 1988/1989 com valores de SPEI6 -2,04 e SPEI4 de -2,02.

Pelas tabelas 7 e 8 observa-se que os modelos se aproximam do observado no número de eventos extremos de seca simulados. A diferença principal, está na distribuição dos episódios de seca no período, em que o modelo Eta-HadGEM2-ES concentra os episódios de seca, principalmente, nas décadas de 1960 e 1970. O modelo Eta-MIROC5 simula um comportamento mais parecido ao observado (figura 7b), errando menos.

Vicente-Serrano et al. (2009) e Silva e Mello (2018) verificaram uma diferença no comportamento do SPEI e do SPI para a cidade de São Paulo no século XX. Os autores verificaram que a evapotranspiração exerce influência nos episódios de seca na cidade. Entretanto, observando-se as figuras 2c e 6c (projetado) e 3c e 7c (observado) esse comportamento não é notado. De maneira semelhante ao observado nas cidades do sul de Minas Gerais, o modelo Eta-MIROC5 (figura 6c) apresenta um comportamento mais parecido (média móvel) com o observado, embora a quantidade de eventos extremos projetados seja diferente. Foram simulados dois eventos “excepcionalmente secos” em 1963/1964 (SPEI6= -2,30 e SPEI4 = -2,79) e 2001/2002 (SPEI6= -2,36 e SPEI4= -2,38)

Para o modelo Eta-HadGEM2, não foram observados eventos extremos para o SPEI6 e três eventos para o SPEI4 em 1972/1973 (-2,55), 1978/1979 (-2,56) e 2002/2003 (-2,01). Observa-se no, entanto, que esse anos foram “severamente secos” nas simulações de SPEI6.

A região centro-leste de São Paulo apresentou os maiores valores médios de evapotranspiração potencial (tabela 2) entre as cidades estudadas. Porém, as médias de precipitação de $1065 \pm 318\text{mm}$ e $747 \pm 247\text{mm}$ superam os valores de ETp_6 e ETp_4 . Essa observação pode ter influenciado no comportamento semelhante entre SPI e SPEI para o tempo presente (Figura 2d e 6d). Para o modelo Eta-HadGEM2-ES foram observados 2

eventos extremos para SPEI6 de 1972/1973 (-2,13) e 1978/1979 (-2,01) e 3 eventos para o SPEI4 em 1972/1973 (-2,31), 1978/1979 (-2,32) e 2002/2003 (-2,15). Para o modelo Eta-MIROC5 foram observados dois eventos “excepcionalmente secos” para ambos os períodos estudados, sendo observados nos anos de 1963/1964 (SPEI6= -2,3 e SPEI4= -2,8) e 2002/2003 (SPEI6= -2,4 e SPEI4= -2,4).

Observando a figura 6d e 7d, nota-se que o modelo Eta-MIROC5 erra menos ao projetar o comportamento do SPEI. No entanto, o modelo simula uma quantidade maior de eventos “excepcionalmente secos” do que o observado. Seguindo o comportamento observado, nas demais regiões, o modelo Eta-HadGEM2-ES (figura 6d) projetou uma sequência de eventos secos não seguida nos dados observados (figura 7d).

A figura 6e apresenta o comportamento do SPEI6 e SPEI4 simulado para a região metropolitana de Campinas. Observa-se um comportamento muito semelhante a RM-SP e a região centro-leste de São Paulo. Observando os dados de evapotranspiração simulados para as cidades (tabela 2) observa-se que os valores médios são próximos. Para o modelo Eta-hadGEM2-ES um único evento “excepcionalmente seco” foi encontrado no ano de 1972/1973 (-2,06) para SPEI6 e 3 eventos para SPEI4 nos anos de 1972/1973 (-2,17), 1978/1979 (-2,32) e 2002/2003 (-2,02). Para o modelo Eta-MIROC5, foram observados dois eventos extremos para ambos os períodos estudados em 1963/1964 e 2002/2003. Para o SPEI6 os valores foram de -2,15 e -2,58 e para SPEI4 de -2,32 e -2,41, respectivamente.

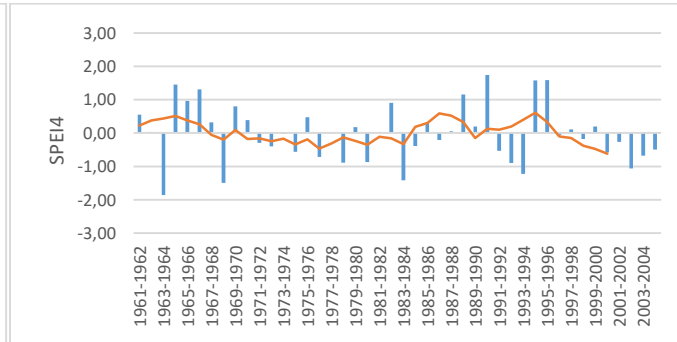
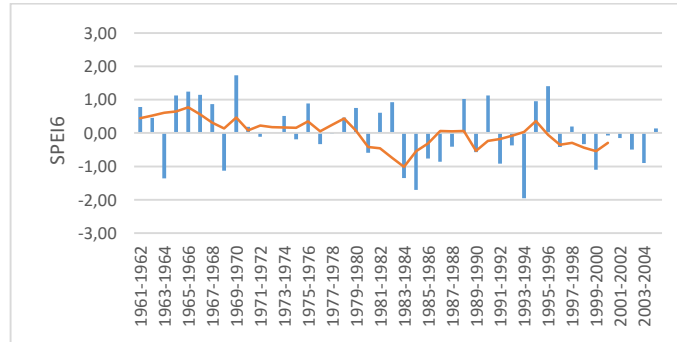
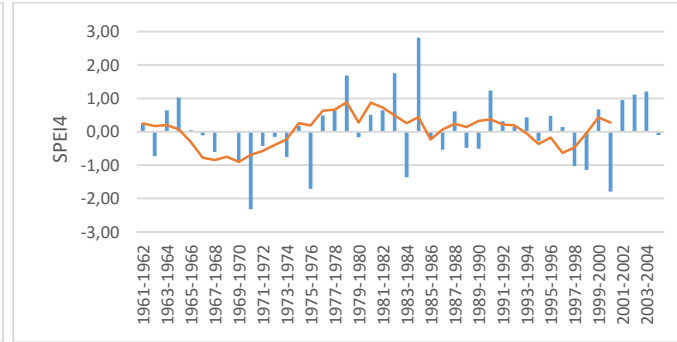
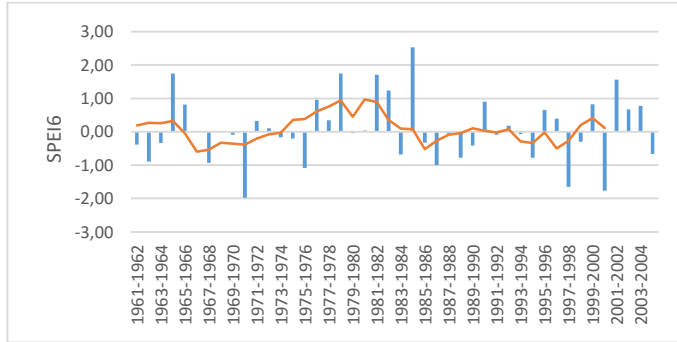
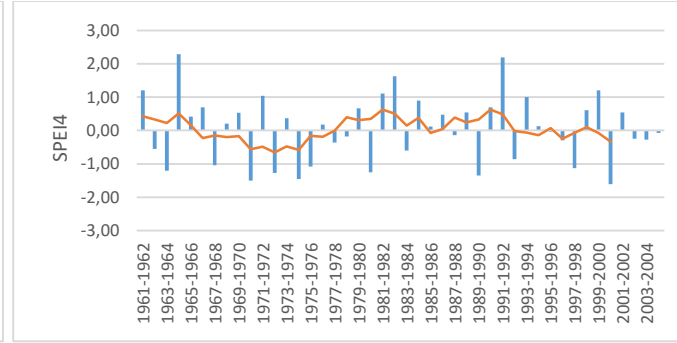
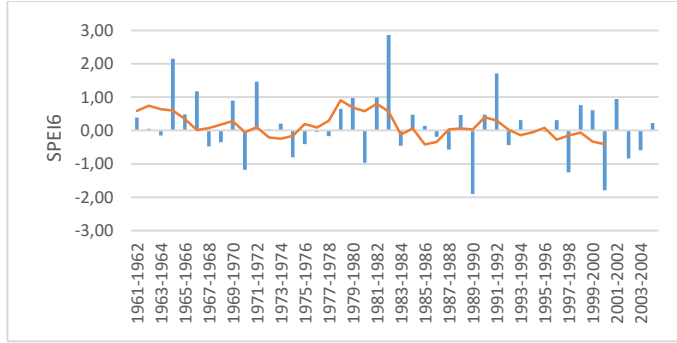
Pela figura 7e nota-se que o modelo Eta-MIRO5 se assemelha, no geral, ao observado. Os modelos simulam uma quantidade maior de eventos extremos do que o SPEI observado na região (tabela 7 e 8).

De maneira geral, não foi observada uma diferença pronunciada entre os índices SPI e SPEI para as cidades observadas. Pelas tabelas 7 e 8 e 1 e 2 nota-se que os valores totais de eventos de seca simulados são semelhantes e que graficamente a diferença é difícil de ser percebida. O SPI e SPEI para o modelo Eta-HadGEM2-ES adotaram o mesmo comportamento com uma concentração maior de eventos de seca nas décadas de 1970 e 1980, com valores seguidos úmidos. Para o modelo Eta-MIROC5, também observa-se o mesmo padrão visual entre SPI e SPEI.





Figura 6, Projeções do SPI referentes aos períodos chuvosos de 6 meses (SPI6) e de 4 meses (SPI4) para regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelo modelo Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES para o tempo presente (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)



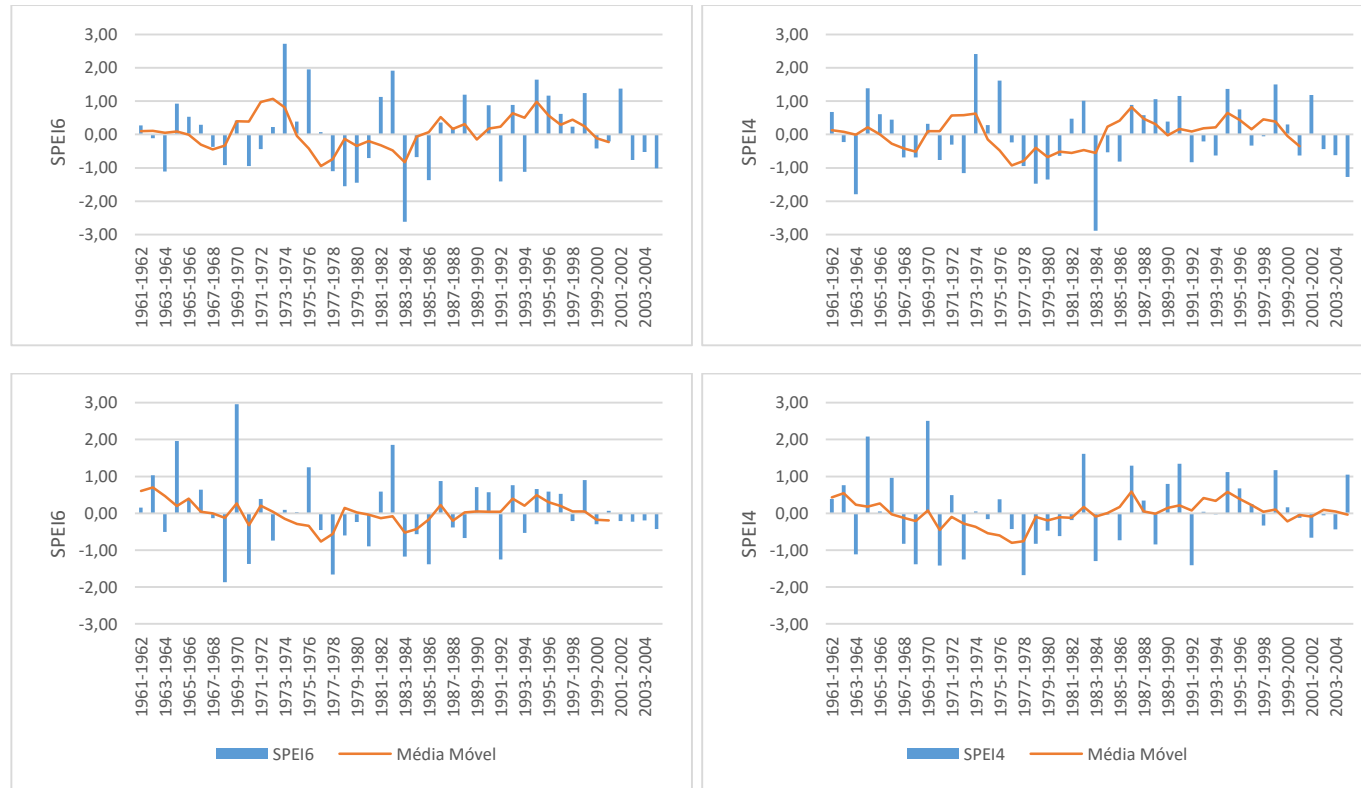


Figura 7. Comportamento do SPI6 e do SPI4 para as regiões estratégicas do Sudeste do Brasil observado de 1961 – 2005. (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 7. Frequência de ocorrência de eventos de seca simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES de 1961-2005 para as regiões estudadas no Sudeste do Brasil com base no SPEI6 e no SPEI4.

		Anormalmente Seco	Moderadamente Seco	Muito Seco	Severamente Seco	Excepcionalmente Seco	Total
Sul de MG (Lavras)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES	3	4	2	2	1	12
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES	6	2	2	2	1	13
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	2	7	3	1	0	13
	Dados Observados SPEI6 (1961-2005)	2	5	0	2	0	9
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES	7	2	2	2	1	14
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES	5	5	3	0	1	14
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	5	3	1	2	1	12
	Dados Observados SPEI6 (1961-2005)	4	4	0	3	0	11
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES	5	6	1	3	0	15
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES	7	1	0	2	3	13
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	5	5	2	1	0	13
	Dados Observados SPEI6 (1961-2005)	3	5	2	2	0	12
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES	3	5	2	1	2	13
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES	2	3	0	2	3	10
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	8	5	2	1	1	17
	Dados Observados SPEI6 (1961-2005)	4	6	4	0	1	15
RM Campinas (IAC)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES	2	5	2	2	1	12
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES	2	3	1	1	3	10
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	3	6	3	1	0	13
	Dados Observados SPEI6 (1961-2005)	5	3	2	2	0	12

Tabela 8. Frequência de ocorrência de eventos de seca simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES de 1961-2005 para as regiões estudadas no Sudeste do Brasil com base no SPEI6 e no SPEI4.

		Anormalmente Seco	Moderadamente Seco	Muito Seco	Severamente Seco	Excepcionalmente Seco	Total
Sul de MG (Lavras)	SPEI6 Eta-MIROC5	4	7	2	2	0	15
	SPEI4 Eta-MIROC5	2	8	1	3	0	15
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	2	7	3	1	0	13
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	2	5	0	2	0	9
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPEI6 Eta-MIROC5	6	3	2	2	1	15
	SPEI4 Eta-MIROC5	4	4	1	3	1	16
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	5	3	1	2	1	12
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	4	4	0	3	0	11
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPEI6 Eta-MIROC5	5	2	2	0	2	9
	SPEI4 Eta-MIROC5	3	3	2	1	2	11
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	5	5	2	1	0	13
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	3	5	2	2	0	12
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPEI6 Eta-MIROC5	5	2	2	0	2	13
	SPEI4 Eta-MIROC5	3	3	2	1	2	11
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	8	5	2	1	1	17
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	4	6	4	0	1	15
RM Campinas (IAC)	SPEI6 Eta-MIROC5	4	4	1	1	2	13
	SPEI4 Eta-MIROC5	4	2	3	1	2	11
	Dados Observados SPEI4 (1961-2005)	3	6	3	1	0	13
	Dados Observados SPI6 (1961-2005)	5	3	2	2	0	12

3.4.2. Análise das projeções segundo o modelo Eta-HadGEM2-ES

Como observado por Chou et al. (2014a, 2014b) e por (COLLINS et al., 2013), a evapotranspiração apresentou tendência de crescimento em ambos os modelos, cenários e regiões estudadas no presente trabalho. O modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta valores de evapotranspiração potencial maiores que os simulados pelo modelo Eta-MIROC5. Por outro lado, observa-se que o modelo Eta-MIROC, apresenta valores de precipitação médios maiores e, inclusive, em algumas situações com tendência positiva de crescimento. Dessa maneira, espera-se que o comportamento, principalmente, no fim do século XXI será diferente entre o SPI e o SPEI.

Analisando o modelo Eta-HadGEM2-ES, a região sul de Minas Gerais (figura 8a) apresenta uma diferença entre os cenários 4.5 e 8.5. No cenário 4.5, nota-se que os episódios de seca estão agrupados de forma semelhante ao SPI (figura 4). Não foram observados nenhum evento “extremamente seco” para o RCP4.5. Por outro lado, o cenário 8.5 apresenta comportamento diferente. Como cenário simula o crescimento das emissões de gases do efeito estufa até o fim do século XXI, observa-se que os eventos de seca, tendem a se tornar mais presentes na segunda metade do século XXI, com 20 dos 25 eventos de seca observados a partir de 2060 para o SPEI6. Foram observados 4 eventos extremos de seco para o SPEI6 nos anos de 2080/2081 (-2,08), 2084/2085 (-2,20), 2094/2095(-2,03) e 2098/2099 (-2,15) e 1 evento para SPI4 no ano de 2084/2085 (-2,26).

A região metropolitana de Belo Horizonte (figura 8b) apresenta comportamento semelhante a região sul de Minas Gerais. Foi observado somente um evento extremo de seca para o SPEI6 para o cenário 4.5 no ano de 2083/2084 (-2,16) e nenhum evento extremo para o período de verão. Para o cenário 8.5 observa-se que a maioria dos eventos de seca estão localizados a partir da década de 2060. Para o SPEI 4, 17 dos 26 eventos de seca observados são observados nesse período (tabela 9), enquanto 19 dos 25 eventos são simulados para o SPEI6. Apenas um evento extremo é simulado para o período chuvoso em 2080/2081 (-2,43) e dois para o período chuvoso em 2084/2085 (-2,15) e 2085/2086 (-2,10).

A crise de hídrica de 2013/2014 e 2014/2015 abaixou o nível de diversos reservatórios do estado de São Paulo. O comportamento futuro das secas em São Paulo pode ser uma ferramenta para pesquisadores e gestores compreenderem os impactos das mudanças climáticas na região. Além disso, Vicente Serrano et al. (2009) destacam a influência do SPEI na cidade de São Paulo, em que o índice se mostrou mais sensível que o SPI. Para a

RM-SP, a figura 8c, nota-se que o cenário 4.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES simulou 3 eventos “excepcionalmente secos” para o SPEI6 nos anos de 2082/2083 (-2,36), 2083/2084 (-2,05) e 2084/2085 (-2,05), e dois eventos “excepcionalmente secos” para o SPEI4 nos anos de 2084/2085 (-2,04), 2085/2086 (-2,17).

A região Centro-Leste de São Paulo é representada na figura 8d. Observa-se que pelo cenário 4.5 para SPEI6 foram simulados dois eventos extremos em 2083/2084 (-2,04) e 2083/2085 (-2,69) e para SPEI4 três eventos nos anos de 2083/2084 (-2,39), 2084/2085 (-2,56) e 2087/2088 (-2,22). Os anos “extremamente secos” são coincidentes com os encontrados para São Paulo, mostrando uma variação espacial pequena da temperatura nas simulações. Para o RCP8.5, observou-se 2 eventos extremos para SPEI6 e para SPEI4, todos localizados no fim do século XXI. Para os meses chuvosos eles são simulados em 2079/2080 (-2,13) e 2098/2099 (-2,57), enquanto para os meses de verão são localizados nos anos de 2079/2080 (-2,07) e 2098/2099(-2,76). Dos eventos de seca simulados para o RCP8.5, 17 dos 24 eventos de seca em todo século XXI (tabela 9) estão localizados após o ano hidrológico de 2079/2080 para os meses de verão, enquanto para os meses chuvosos 16 de 25 eventos são localizados nessas duas décadas, o que confirma a tendência de crescimento da temperatura e evapotranspiração potencial no cenário do IPCC.

A região Metropolitana apresenta comportamento semelhante as RM-SP e a região centro leste de São Paulo. O cenário 4.5 do modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta 2 eventos extremos de seca simulados nos anos de 2083/2084 (-2,01) e 2084/2085 (-2,66) para SPEI6 e 3 eventos nos anos de 2083/2084 (-2,21), 2084/2085 (-2,46) e 2087/2088 (-2,01). Para o cenário 8.5, os eventos se concentram de seca a partir da década de 1980, principalmente. Para os meses chuvosos 18 dos 26 eventos de seca estão localizados nesse período, enquanto que para os meses de verão, observam-se 18 dos 24 eventos simulados (tabela 9). Para o SPEI6 e SPEI4, 2 eventos extremos de seca foram simulados. Para o primeiro eles foram observados nos anos 2079/2080 (-2,05), 2098/2099 (-2,79) e para o segundo, nos mesmos anos com valores de -2,08 e -2,71, respectivamente.

De maneira geral, os meses e chuvosos apresentam o mesmo comportamento para simular os eventos de seca na região Sudeste do Brasil. O número de eventos de seca simulados (tabela 9) é muito semelhante e o comportamento da média móvel ajuda a compreender visualmente os períodos de seca.

Comparando os índices, observa-se que o cenário 4.5 se aproxima para o SPI e para o SPEI. Observa-se o agrupamento dos índices de seca em blocos, sendo o primeiro geralmente na segunda e terceira década do século XXI e o segundo após a década de 2050 (Figuras 4 e 8). Por outro lado, o cenário 8.5 apresentou comportamento diferente entre os índices. O aumento gradual da temperatura até o final do século contribuiu para que os valores de evapotranspiração potencial fosse cada vez maiores. Dessa maneira o balanço hídrico vertical (P-ETp) foi ficando cada vez menor, de forma que a maioria dos valores de SPEI ficassem concentrados nas últimas década do século XXI.

Observando o modelo ao baseline, não foram observadas diferenças em relação ao modelo Eta-HadGEM2-ES (tabela 7 e 8). Em alguns casos como a região sul de minas cenário 4.5, não são observados nenhum evento de seca extrema, enquanto o baseline apresenta 1 evento. Para as RM-SP e RM-Campinas, em que o baseline apresentou 3 eventos “excepcionalmente secos” simulados, também foram observados 3 eventos simulados para o Eta-HadGEM2-ES.

Então, a adição dos gases do efeito estufa as simulações não influenciou a frequência e a magnitude dos eventos de seca no decorrer do século XXI. Porém, os longos períodos de seca simulados, mesmo que não tão extensos, podem significar perdas econômicas, naturais e humanas inestimáveis a região sudeste do Brasil.

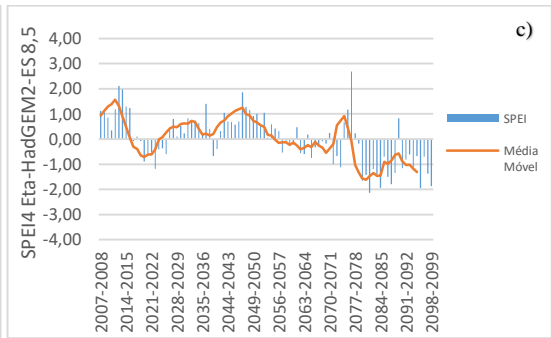
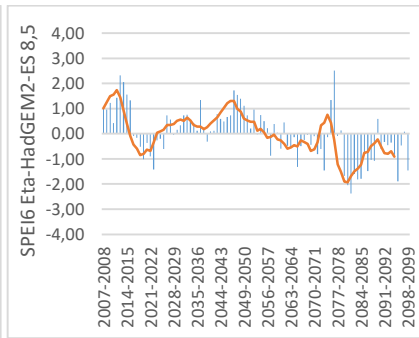
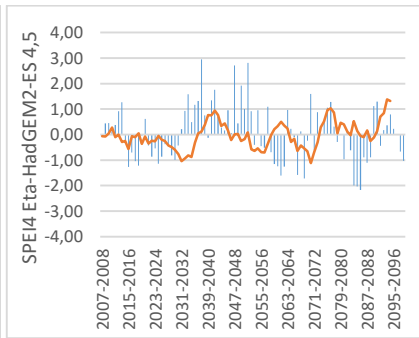
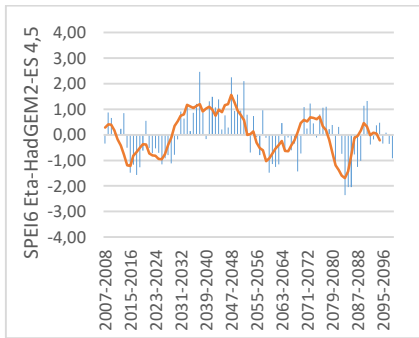
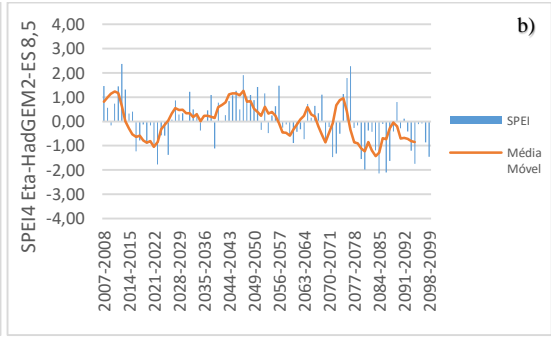
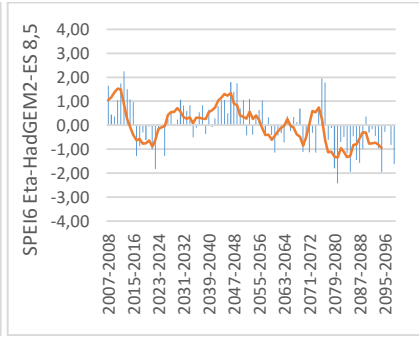
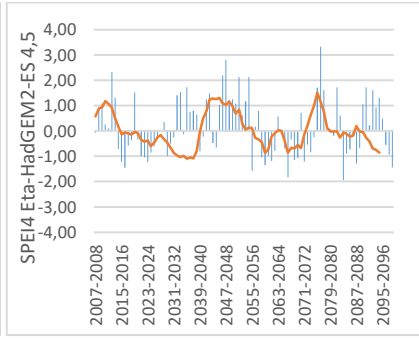
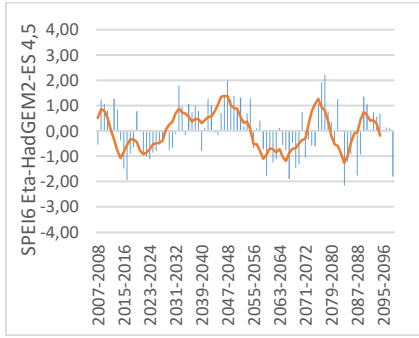
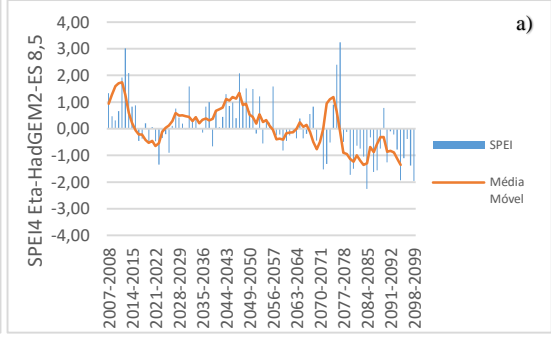
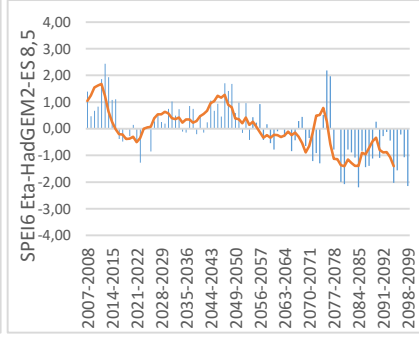
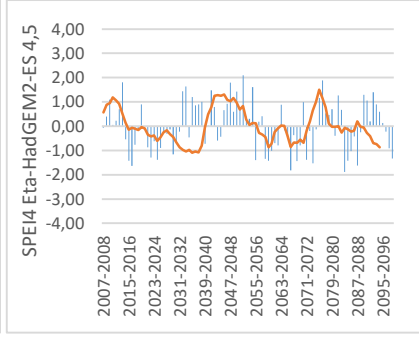
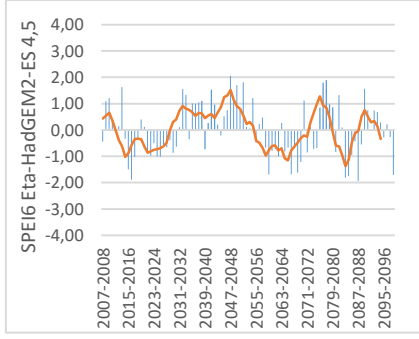




Figura 8. Projeções do SPEI referentes aos períodos chuvosos de 6 meses (SPEI6) e de 4 meses (SPEI4) para regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 9. Eventos de seca observados de 2007-2009 para as regiões do centro-sul do Sudeste do Brasil com base no SPEI6 e no SPEI4 para o modelo Eta-HadGEM2-ES.

	Classificação	AS	ModS	MS	SS	ES	Total
Sul de MG (Lavras)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 4,5	12 1 evento/7,7 anos	12 1 evento/7,7 anos	1 1 evento/92 anos	8 1 evento/11,5 anos	0 -	33
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 4,5	9 1 evento/10,2 anos	7 1 evento/13,1 anos	10 1 evento/9,2 anos	4 1 evento/23 anos	0 -	30
	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 8,5	5 1 evento/18,4 anos	12 1 evento/7,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	4 1 evento/23 anos	25
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 8,5	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	6 1 evento/15,3 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	24
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 4,5	15 1 evento/6,1 anos	11 1 evento/8,4 anos	3 1 evento/30,7 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	35
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 4,5	10 1 evento/9,2 anos	17 1 evento/5,4 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	0 -	33
	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 8,5	5 1 evento/18,4 anos	12 1 evento/7,7 anos	2 1 evento/46 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	25
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 8,5	7 1 evento/13,1 anos	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	26
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 4,5	14 1 evento/6,6 anos	12 1 evento/7,7 anos	4 1 evento/23 anos	0 -	3 1 evento/30,7 anos	33
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 4,5	7 1 evento/13,1 anos	16 1 evento/5,8 anos	1 1 evento/92 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	29
	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 8,5	7 1 evento/13,1 anos	7 1 evento/13,1 anos	5 1 evento/18,4 anos	5 1 evento/18,4 anos	2 1 evento/46 anos	26
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 8,5	13 1 evento/7,1 anos	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	32
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 4,5	13 1 evento/7,1 anos	13 1 evento/7,1 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	32
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 4,5	10 1 evento/9,2 anos	14 1 evento/6,6 anos	5 1 evento/18,4 anos	0 -	3 1 evento/30,7 anos	32
	SPEI6 Eta-HadGEM2-ES 8,5	7 1 evento/13,1 anos	8 1 evento/11,5 anos	3 1 evento/30,7 anos	5 1 evento/18,4 anos	2 1 evento/46 anos	25
	SPEI4 Eta-HadGEM2-ES 8,5	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	3 1 evento/30,7 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	24

RM Campinas (IAC)	SPEI6 Eta- HadGEM2-ES 4,5	10 1 evento/9,2 anos	15 1 evento/6,1 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	31
	SPEI4 Eta- HadGEM2-ES 4,5	10 1 evento/9,2 anos	15 1 evento/6,1 anos	4 1 evento/23 anos	0 -	3 1 evento/30,7 anos	32
	SPEI6 Eta- HadGEM2-ES 8,5	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	7 1 evento/13,1 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	26
	SPEI4 Eta- HadGEM2-ES 8,5	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	3 1 evento/30,7 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	24

3.4.3. Análise das projeções segundo o modelo Eta-MIROC5

O modelo Eta-MIROC5 foi caracterizado por um volume de precipitação simulado maior que o modelo Eta-HadGEM2-ES, apresentando inclusive tendência de crescimento até o fim do século XXI. Chou et al. (2014b) atribuem, entre vários fatores para o crescimento da precipitação, a intensificação da zona de convergência do Atlântico Sul na região. Esse crescimento da precipitação fez com o balanço hídrico vertical (P-Etp) não fosse afetado da mesma maneira como o modelo Eta-HadGEM2-ES. Esse comportamento influenciou os cenários de forma que a média móvel se assemelhasse entre eles, conforme a figura 7.

Para a região sul de Minas Gerais o (figura 7a), o modelo Eta-MIROC5 cenário 4.5 apresentou 1 evento extremo de seca simulado em 2098/2099 (-2,97) para os meses chuvosos e três eventos extremos simulados para o verão em 2033/2034 (-2,10), 2067/2068(-2,00) e 2098/2099 (-3,29). Já para o RCP 8.5, 2 eventos extremos foram verificados para SPEI6 nos anos de 2086/2087 (-2,42) e 2098/2099 (-2,04), enquanto que para o SPEI4, um evento foi simulado em 2033/2034 (-2,23).

Observa-se que os valores, com exceção ao ano de 2098/2099, os anos em que os episódios de seca simulado por SPEI6 e SPEI4 tendem a ser diferentes. Esse comportamento também foi observado para o modelo Eta-MIROC5 para o SPI e pode ser justificado como uma concentração da época chuvosa pelo modelo em um período de tempo menor ou igual a 4 meses. Além disso, verificou-se que no RCP 8.5, apenas 7 dos 29 eventos registrados para SPEI6 e 7 dos 28 registrados para SPEI4 aconteceram após a década de 2080 (tabela 10), diferente do que acontecia no modelo Eta-HadGEM2-ES.

Comportamento semelhante a região de Lavras é observado na região metropolitana de Belo Horizonte (7b). Para o cenário 4.5, os meses chuvosos simularam 3 eventos em 2028/2029(-2,33), 2067/2068 (-2,40) e 2098/2099 (-2,87), e os meses de verão 2040/2041 (-2,23), 2068/2069 (-2,72), 2084/2085 (-2,41). Para o cenário 8.5, 2 eventos “excepcionalmente secos” foram simulados em 2086/2087 (-2,42) e 2098/2099 (-2,04), enquanto que para SPEI4 somente 1 evento dessa magnitude foi simulado em 2033/2034 (-2,23).

Compara os dois modelos para a RM-BH, observa-se que há um pequeno crescimento no número total de eventos de seca simulados (tabela 9 e 10). Mas a grande

diferença está no número de eventos extremos simulado pelo modelo Eta-MIROC5. Observa-se que pelo modelo Eta-HadGEM-2 a presença de 1 evento para SPEI4 e SPEI6, RCP4.5, enquanto que para o modelo Eta-MIROC5, 3 eventos são verificados. Situação parecida ocorre para o RCP8.5, em que para o SPEI4 foi observado 1 evento e para o SPEI6 2, enquanto para ambos os períodos do Eta-MIROC5, 3 eventos foram simulados.

A região metropolitana de São Paulo (figura 7c) apresentou 2 eventos “excepcionalmente secos” simulados para o cenário 4.5 em ambos os períodos estudados. Para o SPEI6 os anos hidrológicos simulados foram os de 2057/2058 (-2,22) e 2085/2086 (-2,21) e para SPEI4 em 2009/2010 (-2,66) e 2029/2030 (-2,04). Para o RCP8.5, ambos os períodos estudados apresentaram 2 eventos “excepcionalmente secos”. Para SPEI6, os eventos foram simulados em 2035/2036(-2,37) e 2056/2057 (-2,40) e para SPEI4 em 2056/2057 (-2,88) 2066/2067 (-2,02). Diferentemente das regiões de Minas Gerais, observa-se que a última década do século XXI, apresenta valores de SPEI positivos para o RCP8.5, indicando o efeito da tendência positiva na precipitação.

A região centro Leste do estado de São Paulo (figura 7d) apresentou comportamento semelhante a RM-SP com o cenário 8.5 apresentando valores positivos no fim do século XXI. Para o RCP4.5, observou-se 2 eventos extremos de seca para o SPEI6 em 2057/2058 (-2,20) e 2098/2099 (-2,24) e 1 para o SPEI4 em 2098/2099 (-2,59). Para o cenário 8.5, observou-se 3 eventos “excepcionalmente secos” para o SPEI6 em 2035/2036 (-2,11), 2056/2057 (-2,10), 2061/2062 (-2,12) e 1 para o SPEI4 em 2056/2057(-2,85).

A RM-Campinas (figura 7e) apresentou 2 eventos extremos de seca para o SPEI6, RCP4.5, em 2009/2010 (-2,01) e 2098/2099 (-2,53) e 1 evento extremo para o SPEI4 no ano de 2098/2099 (-2,32). Para o cenário 8.5, o comportamento foi semelhante as RM-Campinas e RM-SP, apresentando SPEI6 “excepcionalmente seco” em 2056/2057 (-2,01), enquanto que para o SPEI4 esses eventos foram registrados 2035/2036 (-2,20) e 2056/2057 (-2,58).

Comparando-se o número de eventos extremos entre o modelo Eta-MIROC5 e o baseline (tabelas 8 e 10), observa-se que a cidade de Lavras apresentou um crescimento no número de observações, uma vez que o baseline não simulava nenhum evento dessa magnitude. Para as demais cidades, o número de simulações foi próximo ao baseline. A partir disso, infere-se que o modelo Eta-MIROC5, apesar do aumento da temperatura e da evapotranspiração, não simula um aumento na intensidade ou na frequência de eventos extremos de seca. O modelo, porém, simula a ocorrência de anos seguidos de eventos

moderados, que podem ter impactos como as secas de 2013/2014 e 2014/2015 no sudeste do Brasil (Coelho et al. 2016; Marengo et al., 2015).

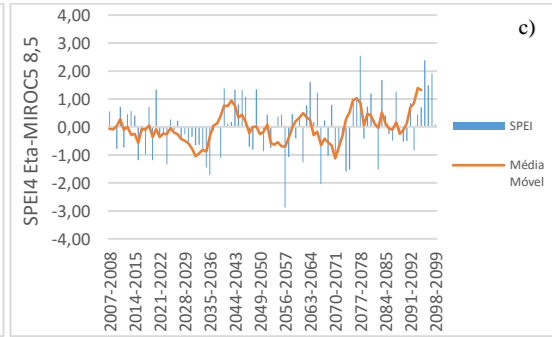
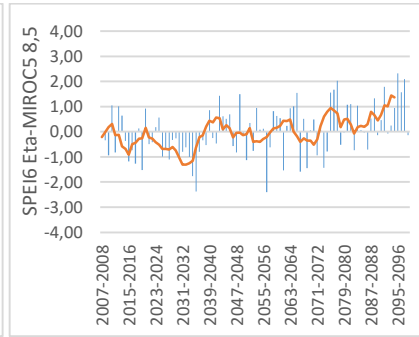
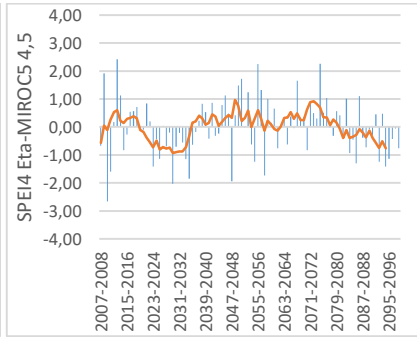
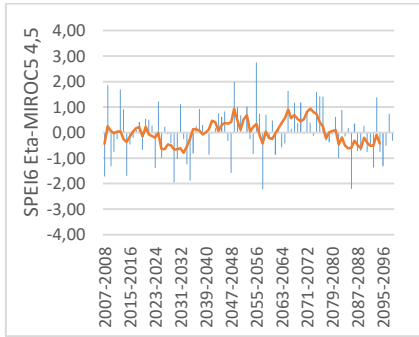
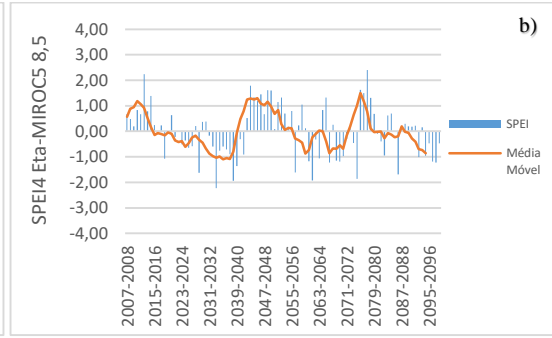
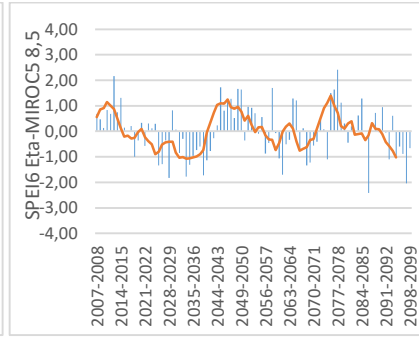
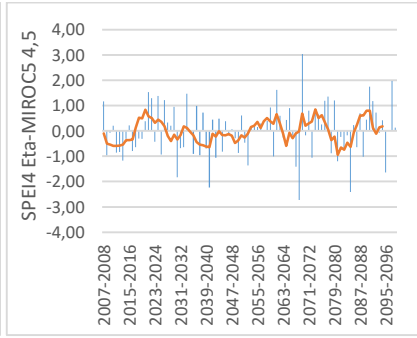
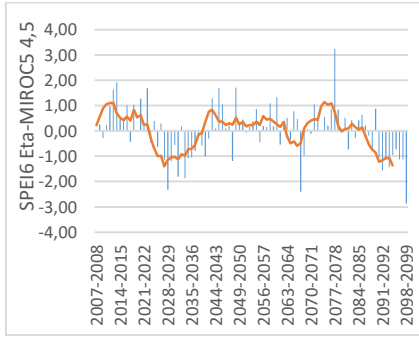
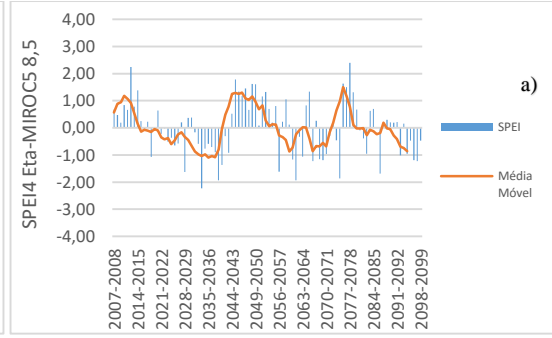
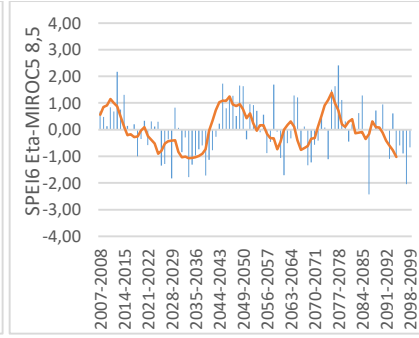
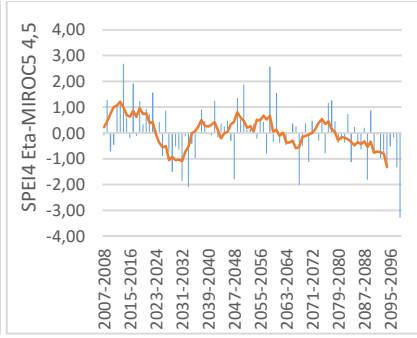
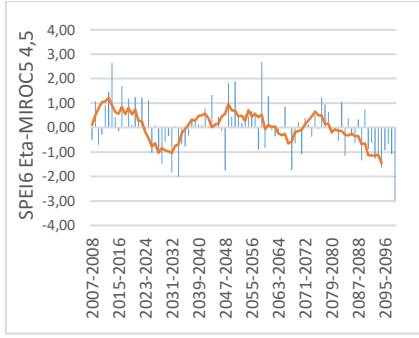




Figura 9. Projeções do SPEI referentes aos períodos chuvosos de 6 meses (SPI6) e de 4 meses (SPI4) para regiões estratégicas do Sudeste do Brasil simulados pelo modelo Eta-MIROC5 (a. Sul de Minas Gerais; b. RM-BH; c. RM-SP; d. Centro-Leste de SP; e. RM-Campinas)

Tabela 10 Frequência de ocorrência de eventos de seca observados de 1933-2016 para as regiões do centro-sul do Sudeste do Brasil com base no SPI6 e no SPI4.

	Classificação	AS	ModS	MS	SS	ES	Total
Sul de MG (Lavras)	SPEI6 Eta- MIROC5 4,5	9 1 evento/10,2 anos	11 1 evento/8,4 anos	2 1 evento/46 anos	5 1 evento/18,4 anos	1 1 evento/92 anos	28
	SPEI4 Eta- MIROC5 4,5	10 1 evento/9,2 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	24
	SPEI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	12 1 evento/7,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	29
	SPEI4 Eta- MIROC5 8,5	6 1 evento/15,3 anos	14 1 evento/6,6 anos	1 1 evento/92 anos	6 1 evento/15,3 anos	1 1 evento/92 anos	28
RM Belo Horizonte (Nova Lima)	SPEI6 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	12 1 evento/7,7 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	27
	SPEI4 Eta- MIROC5 4,5	6 1 evento/15,3 anos	16 1 evento/5,8 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	29
	SPEI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	12 1 evento/7,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	29
	SPEI4 Eta- MIROC5 8,5	6 1 evento/15,3 anos	14 1 evento/6,6 anos	1 1 evento/92 anos	6 1 evento/15,3 anos	1 1 evento/92 anos	28
RM São Paulo (São Paulo IAG)	SPEI6 Eta- MIROC5 4,5	10 1 evento/9,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	6 1 evento/15,3 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	29
	SPEI4 Eta- MIROC5 4,5	11 1 evento/8,4 anos	8 1 evento/11,5 anos	2 1 evento/46 anos	4 1 evento/23 anos	2 1 evento/46 anos	27
	SPEI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	15 1 evento/6,1 anos	7 1 evento/13,1 anos	0 -	2 1 evento/46 anos	32
	SPEI4 Eta- MIROC5 8,5	4 1 evento/23 anos	15 1 evento/6,1 anos	3 1 evento/30,7 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	26
Região Centro-Leste SP (Piracicaba)	SPEI6 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	12 1 evento/7,7 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	30
	SPEI4 Eta- MIROC5 4,5	8 1 evento/11,5 anos	8 1 evento/11,5 anos	7 1 evento/13,1 anos	3 1 evento/30,7 anos	1 1 evento/92 anos	27
	SPEI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	10 1 evento/9,2 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	3 1 evento/30,7 anos	29
	SPEI4 Eta- MIROC5 8,5	4 1 evento/23 anos	10 1 evento/9,2 anos	6 1 evento/15,3 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	25

RM Campinas (IAC)	SPEI6 Eta- MIROC5 4,5	10 1 evento/9,2 anos	8 1 evento/11,5 anos	5 1 evento/18,4 anos	3 1 evento/30,7 anos	2 1 evento/46 anos	28
	SPEI4 Eta- MIROC5 4,5	3 1 evento/30,7 anos	11 1 evento/8,4 anos	6 1 evento/15,3 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	25
	SPEI6 Eta- MIROC5 8,5	8 1 evento/11,5 anos	4 1 evento/23 anos	8 1 evento/11,5 anos	4 1 evento/23 anos	1 1 evento/92 anos	25
	SPEI4 Eta- MIROC5 8,5	6 1 evento/15,3 anos	11 1 evento/8,4 anos	6 1 evento/15,3 anos	2 1 evento/46 anos	2 1 evento/46 anos	27

4. Conclusão

O SPI e o SPEI são índices de simples cálculo que apresentam ótimos resultados na determinação de eventos de seca, sua frequência e sua duração. Os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 apresentaram comportamentos diferentes em relação a simulação de eventos de seca no futuro.

O modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta médias históricas de precipitação simuladas menores que as do modelo Eta-MIROC5. Entretanto, os valores de evapotranspiração potencial médios são maiores. Essa relação, influenciou no cálculo do balanço vertical (P-ETp), com destaque no RCP 8.5.

O índice SPI calculado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou episódios de seca em blocos em seu baseline. O modelo tende a simular eventos de seca em sequência, seguidos por anos úmidos. Esse comportamento é observado nas simulações dos cenários 4.5 e 8.5. A diferença entre os cenários está no final do século XXI, em que observam-se mais eventos de seca no RCP8.5. Além disso, os meses chuvosos e de verão tendem a projetar os episódios de seca no mesmo ano, não apresentando diferenças entre eles.

O modelo Eta-MIROC5 simulou uma alternância maior dos eventos de seca e eventos úmidos projetados de 1961-2005. Esse comportamento difere do modelo Eta-HadGEM2-ES e mantém-se nas simulações, tanto para o cenário 4.5 e 8.5. Este último cenário apresentou tendência de crescimento na precipitação, o que concentrou valores positivos no fim do século XXI. Observa-se ainda que o modelo Eta-MIROC5 concentra os períodos de chuva em alguns meses do ano. Dessa forma a uma variação maior entres os anos extremos de seca dos meses de outubro a março e dezembro a março.

Comparado com os dados observados pelas estações meteorológicas de 1961 a 2005, o modelo Eta-MIROC5 simula um comportamento mais parecido a série original. O comportamento do modelo Eta-HadGEM2-ES de agrupar eventos consecutivos de seca não foi observado nas regiões estratégicas do Sudeste do Brasil.

O SPEI mostrou-se uma ferramenta interessante de estudo para o modelo Eta-HadGEM2-ES. O cenário 8.5 simula o crescimento da evapotranspiração até o fim do século XXI. Dessa maneira, observa-se uma diferença entre os dois cenários do IPCC. Os episódios de seca no cenário 4.5 estão espalhadas durante toda a projeção, ainda que em blocos, enquanto o cenário 8.5 concentra os episódios de seca nas duas últimas décadas da simulação (2080 e 2090).

Por outro lado o SPEI mostrou comportamento semelhante ao SPI no modelo Eta-MIROC5. Como os valores de chuva são maiores e tendem a crescer com o passar do tempo, o crescimento da evapotranspiração coincide com o crescimento da precipitação, de forma que o balanço hídrico vertical, seja menos afetado nesse modelo do que no modelo Eta-HadGEM2-ES.

Observa-se ainda que os modelo não tendem a intensificar os efeitos das secas, ou seja, torna-las ainda mais extremas. Porém, o SPI e o SPEI mostraram que podem haver períodos extensos de seca, com 5 ou 10 anos consecutivos com déficit de precipitação e aumento da temperatura.

Dessa forma, como os modelos preveem o crescimento da temperatura pela adição de gases do efeito estufa, recomenda-se o uso do modelo Eta-HadGEM para a região sudeste.

5. Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica. Capacidade Instalada por Estado. Brasília-DF: 2018 Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?q=aneel&oq=aneel&aqs=chrome..69i57j69i60j0l2j69i60l2.1316j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>. Acesso em 02 jan. 2018

AKBARI, H. et al. Drought Analysis Based on Standardized Precipitation Index (SPI) and Streamflow Drought Index (SDI) in Chenar Rahdar River Basin , Southern Iran. **Watershed Management 2015**, p. 11–22, 2015.

ALSTON, M.; KENT, J. **Social Impacts of Drought: A report to NSW Agriculture**A report to NSW Agriculture. Wagga Wagga/ Australia: 2004.

ANDEREGG, W. R. L. Spatial and temporal variation in plant hydraulic traits and their relevance for climate change impacts on vegetation. **New Phytologist**, v. 205, n. 3, p. 1008–1014, 2015.

ANEEL, A. N. DE E. E.-. **Capacidade Instalada por Estado**. Brasilia-DF: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.google.com.br/search?q=aneel&oq=aneel&aqs=chrome..69i57j69i60j0l2j69i60l2.1316j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>.

BEGUERÍA, S. et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001–3023, 2014.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265–278, 1994.

BLAIN, G. C. et al. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1067–1073, 2010.

BLAIN, G. C. Séries anuais de temperatura máxima média do ar no Estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 114–124, 2010.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. **118 anos de dados mensais do Índice Padronizado de Precipitação: série meteorológica de Campinas, estado de São Paulo**Revista Brasileira de Meteorologia, , 2011a.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T. 118 ANOS DE DADOS MENSAIS DO ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO : SÉRIE METEOROLÓGICA DE CAMPINAS , ESTADO DE SÃO PAULO. p. 287–294, 2011b.

BRUYÈRE, C. L. et al. Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 7, p. 1847–1856, 2014.

BUENO, E. DE O.; MELLO, C. R. DE; ALVES, G. J. Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. **Rbrh**, v. 21, n. 3, p. 570–575, 2016.

CALOIERO, T. et al. **An Analysis of the Occurrence Probabilities of Wet and Dry Periods through a Stochastic Monthly Rainfall Model**Water , 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. DROUGHT IN BRAZIL DURING SUMMER AND FALL 2001 AND ASSOCIATED ATMOSPHERIC CIRCULATION FEATURES. **Circulation**, n. January, 2001.

CHANDA, K.; MAITY, R. Meteorological Drought Quantification with Standardized Precipitation Anomaly Index for the Regions with Strongly Seasonal and Periodic Precipitation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 20, n. 12, p. 6015007, 2015.

CHEN, H.; SUN, J. Changes in drought characteristics over china using the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 28, n. 13, p. 5430–5447, 2015.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. December, p. 512–525, 2014a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512–527, 2014b.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11–12, p. 3737–3752, 2016.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 769–784, 2016.

COLLINS, M. et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.). . **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 4, n. 2, p. 997–1062, 2011.

COPASA. **Nível dos Reservatórios de Belo Horizonte e Nova Lima**. Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/abastecimento-de-agua/nivel-dos-reservatorios>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

CUBASCH, U. et al. Introduction. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.). . **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

DAS, P. K. et al. Trends and behaviour of meteorological drought (1901–2008) over Indian region using standardized precipitation–evapotranspiration index. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 2, p. 909–916, 1 fev. 2016.

EHRET, U. et al. HESS Opinions “should we apply bias correction to global and regional climate model data?” **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3391–3404, 2012.

ELÉTRICA, D. DE Á. E E. **Nível do Rio Piracicaba**. Disponível em:

<<https://www.saisp.br/geral/Processo.whtml?USERID=PuB&produto=56&ovlCode=ESP&OK=OK&BACKCOLOR=1&whichCode=0>>. Acesso em: 13 fev. 2018.

ELKIN, C. et al. Short- and long-term efficacy of forest thinning to mitigate drought impacts in mountain forests in the European Alps. **Ecological Applications**, v. 25, n. 4, p. 1083–1098, 2015.

GOOD, P. et al. Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC. **Journal of Climate**, v. 26, n. 2, p. 495–511, 27 abr. 2012.

GOUVEIA, C. M. et al. Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. **Global and Planetary Change**, v. 151, n. July, p. 15–27, 2017.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation Anomalies in Southern Brazil Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

GUPTA, V.; JAIN, M. K. **Comparison of SPI and SPEI indices for Drought Characterization under Climate Change Scenario in India**. American Geophysical Union, Fall Meeting 2017. **Anais...**New Orleans: 2017

HAYES, M. Drought Indices. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. July, p. 18, 2002.

HIRSCHI, M. et al. Using remotely sensed soil moisture for land-atmosphere coupling diagnostics: The role of surface vs. root-zone soil moisture variability. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 246–252, 2014.

IBGE. **Cidades de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=>>>.

KARAVITIS, C. A. et al. **Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece** **Water**, 2011.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. New York: Oxford University Press, 1975.

KIST, A.; FILHO, J. S. DAS V. Análise probabilística da distribuição de dados diários de chuva no estado do Paraná. **Revista Ambient. Água**, v. 10, n. 1, p. 172–181, 2014.

KRISHNAN, P. et al. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 3–4, p. 208–223, 2006.

LAFON, T. et al. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1367–1381, 1 maio 2013.

LEWIS, S. L. et al. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, n. 6017, p. 554, 2011.

- LIVADA, I.; ASSIMAKOPOULOS, V. D. Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 89, n. 3, p. 143–153, 2007.
- MANN, SH. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MARENGO, J. A. et al. 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. et al. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013.
- MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v. 106, n. September 2015, p. 31–44, 2015.
- MARKHAM, C. G.; MCLAIN, D. R. Sea surface temperature related to rain in Ceara, northeastern Brazil. **Nature**, v. 265, p. 320–325, 1977.
- MCEVOY, D. J. et al. An evaluation of multiscale drought indices in Nevada and Eastern California. **Earth Interactions**, v. 16, n. 18, 2012.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. **Eighth Conference on Applied Climatology**, n. January, p. 17–22, 1993.
- MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas**. Lavras, MG: Editora UFLA, 2013.
- MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1, p. 195–202, 1984.
- MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203–214, 2015.
- NAGHETTINI, M. Parameter and Quantile Estimation. In: NAGHETTINI, M. (Ed.). **Fundamentals of Statistical Hydrology**. Switzerland: Springer, 2017. p. 203–250.
- NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil. **Tellus**, v. 4, p. 336–343, 1972.
- NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015 Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. February, p. 252–262, 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. et al. **Relação Entre o Standardized Precipitation Index (SPI) e os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) no Parque Nacional do Itatiaia Floresta e Ambiente** scielo , , 2017.

OTKIN, J. A. et al. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218–219, p. 230–242, 2016.

OTTO, J. et al. Forest summer albedo is sensitive to species and thinning: How should we account for this in Earth system models? **Biogeosciences**, v. 11, n. 8, p. 2411–2427, 2014.

PALMER, W. C. **Meteorological Drought**. Washington, D.C: 1965, p. 59. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>>.

PANDEY, R.; S. RAMASASTRI, K. **Relationship between the common climatic parameters and average drought frequency**. 2001. v. 15

RAIMUNDO, C. DO C.; SANSIGOLO, C. A.; MOLION, L. C. B. Tendências das classes de Precipitação na Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 397–408, 2014.

RAO, V. B.; HADA, K.; HERDIES, D. L. On the severe drought of 1993 in north-east Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 15, n. 6, p. 697–704, 1995.

SANASA. **INFORMAÇÕES SOBRE INTERRUPÇÕES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2014/10/campinas-tem-5-dia-seguido-de-falta-de-agua-com-20-da-cidade-afetada.html>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

SCHLESINGER, W. H. et al. Forest biogeochemistry in response to drought. **Global change biology**, v. 22, n. 7, p. 2318–2328, 2016.

SMITH, L. T. et al. Drought impacts on children’s respiratory health in the Brazilian Amazon. **Scientific Reports**, v. 4, p. 1–8, 2014.

SORDO-WARD, A. et al. Analysis of current and future SPEI droughts in the La Plata Basin based on results from the regional Eta Climate Model. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 11, 2017.

STAGGE, J.; TALLAKSEN, L. Standardized precipitation–evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters. **International Association of Hydrological Sciences (IAHS)**, v. 10, n. October, p. 367–373, 2014.

STEFAN HASTENRATH; HELLER, L. Dynamics of Climatic Hazards in northeast Brazil. **Quarterly Journal Real Meteorology Society**, v. 103, p. 77–92, 1977.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical**

Review, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

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, 19 nov. 2009.

VINCENT, L. A. et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. **Journal of Climate**, v. 18, n. 23, p. 5011–5023, 2005.

VIRGENS FILHO, J. S. DAS et al. Desempenho dos modelos CLIGEN, LARS-WG e PGECLIMA_R na simulação de séries diárias de temperatura máxima do ar para localidades do estado do Paraná. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 3, p. 538–547, 2013.

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

WILHITE, D. A. Drought as a natural hazard: Concepts and Definitions. In: **Drought: A Global Assessment**. 1st Editio ed. London: Routledge Publishers, 2000. v. 69p. 3–18.

WILLIAMSON, G. B. et al. Amazonian tree mortality during the 1997 El Nino drought. **Conservation Biology**, v. 14, n. 5, p. 1538–1542, 2000.

WMO. **Recommendations for the Verification and Intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP ModelsWorld Weather Research Programme**. [2008]. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/WWRP2009-1_web_CD.pdf>.

WMO; GWP. **Handbook of drought indicators and indices**. Genebra, Suíça: 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought monitoring and early warning: concepts , progress and future challenges**. 2006.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Genebra, Suíça: 2012.

YANG, J. X.; LIJUAN, X. C.; YOUMIN, W. RESEARCH ON DETERMINATION OF STATION INDEXES AND DIVISION OF REGIONAL FLOOD/ DROUGHT GRADES IN CHINA. **Quartely Journal of Applied Meteorology**, v. 8, n. 1, p. 26–33, 1997.

ZARGAR, A. et al. A review of drought indices. **Environmental Reviews**, v. 19, n. NA, p. 333–349, 2011.

ZELEKE, T. T.; GIORGI, F.; ZAITCHIK, B. F. Trend and periodicity of drought over Ethiopia. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY**, 2017.

ZENG, N. et al. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**,

v. 3, n. 1, 2008.