

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – *CAMPUS* CASCAVEL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**A OCORRÊNCIA DE SECAS METEOROLÓGICAS NO ESTADO DO PARANÁ:
UTILIZANDO DADOS HISTÓRICOS E SIMULADOS**

LUCIANA ESPÍNDULA DE QUADROS

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2017

LUCIANA ESPÍNDULA DE QUADROS

**A OCORRÊNCIA DE SECAS METEOROLÓGICAS NO ESTADO DO PARANÁ:
UTILIZANDO DADOS HISTÓRICOS E SIMULADOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Martins Gomes
Co-Orientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

CASCADEL - PARANÁ - BRASIL

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Q18o

Quadros, Luciana Espíndula de

A ocorrência de secas meteorológicas no Estado do Paraná: utilizando dados históricos e simulados. / Luciana Espíndula de Quadros. Cascavel, 2017.

87 f.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Martins Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

1. Secas. 2. Precipitação - Variabilidade. 3. Mudanças climáticas. I. Gomes, Benedito Martins. II. Mello, Eloy Lemos de. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 20.ed. 551.5773

CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

LUCIANA ESPÍNDULA DE QUADROS

A Ocorrência de Secas Meteorológicas no Estado do Paraná: Utilizando Dados Históricos e Simulados

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientadora) - Benedito Martins Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Roberto Rezende

Universidade Estadual de Maringá (UEM)


Jiam Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)


Eloy Lopes de Mello

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Ana Tereza Bittencourt Guimarães

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 9 de fevereiro de 2017

BIOGRAFIA

Luciana Espíndula de Quadros, nasceu em 7 de abril de 1983, na cidade de São Miguel do Iguaçu – PR. No ano de 2000, concluiu o ensino médio no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET e, em março de 2005, formou-se em Licenciatura em Matemática pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, *campus* de Foz do Iguaçu. Em 2008, concluiu o Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola - nível Mestrado, na área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, *campus* de Cascavel. Ingressou, no ano de 2013, na Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola - nível Doutorado.

Como experiência profissional, foi docente em diversos níveis de ensino, do Ensino Fundamental à Graduação. Os principais vínculos empregatícios foram: 2004–2009, Colégio Franciscano Nossa Senhora de Fátima, São Miguel do Iguaçu; 2005–2008, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, *campus* de Foz do Iguaçu; 2008–2009, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR *campus* de Medianeira. Desde 2009 é docente com dedicação exclusiva do Instituto Federal do Paraná - IFPR, *campus* de Foz do Iguaçu.

“Você quer educar? Seja educado. E ser educado
não é falar “licença” e “obrigado”. Ser educado é ser
ético, progressivo e feliz”

Içami-Tiba

“**Educação** é diferente de **Conhecimento**, que é
diferente de **Cultura**”

DEDICATÓRIA

Mãe, você lembra da frase: *Filha, se você quer ter minha profissão não pense pequeno, seja “grande”,* por tudo isso, mas principalmente pela vida, pelo apoio e exemplo de profissional que você sempre foi.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a tantas pessoas, mas primeiramente vou agradecer a Deus por ter me protegido e por me proteger, principalmente na BR 277, agradeço por me iluminar, me conduzir e me abençoar.

Ao meu marido, Alexandre Ghellere, que sempre me apoiou e que compartilha comigo todos os meus passos profissionais e pessoais. Obrigada por ser meu companheiro, namorado, amigo, amante. Que me cuida e transborda meu coração de amor!

À minha mãe, a quem dediquei esta tese; você é um máximo! Obrigada pela educação que meu proporcionou, obrigada por ser minha companheira, obrigada pelas vezes que me forçava a fazer as contas de cabeça, obrigada por ser exemplo como professora, você é muito guerreira, por aguentar tantos anos no magistério. Se hoje sou quem sou, da parte boa, devo a você!

A Daniela e Evandro, vocês fizeram muita falta nessa etapa, mas mesmo longe, sei que sempre torcem por mim, vocês são meu exemplo de perseverança, ética e resiliência!

Diogo, hoje pai de família, novamente eu espero que meu esforço lhe sirva de exemplo. Eu te amo e te apoio, pode contar comigo sempre!

Ao meu pai que, embora não concorde com suas escolhas, agradeço a educação que me deu e pelo dom da vida!

As pessoas que realmente torcem por mim, minhas tias, tios, primas e primos. Também agradeço aos meus cunhados e suas famílias e também à minha sogra Lucir, vocês são hoje minha segunda família, que eu amo e admiro!

À Cyntia e sua família, você que é minha irmã do coração e ao Alexei irmão do coração do Ale. Cy, obrigada pelos conselhos, por estar comigo em momentos bons e ruins, somos tão diferentes em alguns aspectos e nos damos tão bem, acho que por isso nossa amizade é tão forte!

E nessa era de *WhatsApp*, vou agradecer por grupo, G4 poderosas, vocês são minhas BFF, amo vocês, obrigada por me apoiarem, obrigado pelas risadas e por sempre acharem motivo para estourar um champanhe! À vizinhança, eu não poderia morar em uma rua melhor, amo vocês e obrigada por vocês participarem da minha vida! PV o doutorado me proporcionou um conhecimento além da academia, vocês são muito engraçadas! Aos grupos de pedal e academia que sempre me ajudam a desestressar. Ao Grupo de pesquisa; Eloy, obrigado pelas valiosas dicas nas apresentações.

Ao Instituto Federal do Paraná, por ter me proporcionado o afastamento para essa qualificação, espero que esse meu título nos ajude a aprovar um mestrado e, para o futuro, quem sabe, um doutorado. Aos servidores do *campus* Foz do Iguaçu venho dizer que é muito bom trabalhar com todos; com alguns me identifico mais com outros menos, mas tenho certeza que todos temos o mesmo objetivo que é proporcionar uma educação pública, profissional e tecnológica de qualidade, socialmente referenciada, por meio do ensino, pesquisa e extensão. Aos servidores do *campus* Cascavel, Prof. Luiz e Belquis, obrigada pela acolhida em suas residências, um dia espero retribuir. Obrigada pela amizade e apoio de vocês.

Ao mestre e amigo Prof. Dr. Eloy Lemos de Mello, você é uma pessoa iluminada e transmite isso aos que convivem com você. Obrigada pela paciência, pelos conselhos, por ter me adotado como orientanda, pelo exemplo de profissional que é. Quisera que a metade dos servidores públicos fossem comprometidos como você. Espero que essa parceria seja longa. Mais uma vez, muito obrigada!

Ao Prof. Dr. Benedito Martins Gomes, obrigada por você ter me aceitado como orientanda, você foi peça fundamental para eu entrar no doutorado. Entendo que por compromissos profissionais, você não conseguiu me orientar num processo diário, mas sempre estive por perto e deixou alguém extremamente competente no seu lugar. Obrigada professor!

Preciso também agradecer aos que participaram diretamente na construção desse trabalho: Fernanda Cristina Araújo, Fabricio Michel Denes e Ana Tereza Bittencourt Guimarães, vocês foram fundamentais no processo, não tenho palavras para agradecer a vocês, muito obrigada mesmo! Também queria ressaltar, dois profissionais que não conheço pessoalmente, e eu penso que eles não fazem ideia do quanto me ajudaram a encarar esse desafio, com seus conselhos *on-line*: Revanish Deo e Gabriel Blain, obrigado por terem respondido meus e-mails e por não terem me fechado a porta como muitos fizeram.

Para finalizar, gostaria de agradecer a todos os meus professores, desde o jardim de infância até ao doutorado, vocês que contribuíram para minha formação, só tenho a agradecer. Hoje, com orgulho faço parte desse time e é com satisfação que falo sempre: eu lecionei em todas as escolas que estudei. Vocês, meus professores, me inspiraram a seguir nessa profissão tão nobre. Em homenagem ao exemplo de todos, finalizo com essa mensagem:

“Não sou professora por falta de opção, não tive uma má formação, não tenho o pior currículo, não sou incapaz de superar barreiras. Sou professora por escolha, por acreditar que posso plantar sementes de esperança e transformação social. Sou professora porque

nenhuma profissão pode me fazer mais feliz. Acredito no que faço, faço o que amo e faço com excelência.

Sou professora com muito orgulho, com muito amor!”

A OCORRÊNCIA DE SECAS METEOROLÓGICAS NO ESTADO DO PARANÁ: PASSADO E FUTURO

RESUMO

Esse trabalho científico tem como objetivo mostrar ocorrências de seca meteorológica sobre o Estado do Paraná e mostrar possíveis cenários futuros desse extremo climático. Em uma primeira análise dos dados, como tínhamos uma série abrangente de precipitação (período de 1980 a 2010) e também dados simulados pelo modelo global MIROC5 aninhado com o modelo regional Eta (para o futuro até 2050), observamos a necessidade de se entender melhor o regime de precipitação no Estado do Paraná. O artigo 1 tem como objetivos detectar e analisar a variabilidade e a tendência de precipitação sobre o Estado, bem como comparar dados da série histórica com dados da série futura. Os resultados chamam atenção para a grande variabilidade e mudanças significativas na precipitação média mensal que poderão ocorrer no Estado do Paraná. Em um segundo momento, o tema seca extrema foi abordado, com série histórica dos anos de 1980 a 2015. O artigo 2 tem como objetivo analisar a variabilidade e os futuros cenários de seca sobre o estado do Paraná, utilizando o índice padronizado de seca. Os resultados mostram que, apesar de haver uma tendência crescente de precipitação sobre o Estado, também há mudança do cenário de seca, a qual alerta sobre uma possível redução da disponibilidade hídrica, principalmente na mesorregião Metropolitana. Mudanças nas políticas de gestão dos recursos hídricos seriam importantes para auxiliar futuras ações mitigadoras desse fenômeno.

Palavras-chave: variabilidade de precipitação, déficit de precipitação, mudanças climáticas, índice padronizado de seca, cenários futuros.

THE OCCURRENCE OF METEOROLOGICAL DROUGHTS IN PARANÁ STATE: PAST AND FUTURE

ABSTRACT

This research aims to show meteorological drought occurrences in Paraná State and to present possible future scenarios concerning this extreme weather. There was some requirement to understand better the rainfall patterns in Paraná State when data were analyzed at first, since there were an extensive series of historical precipitation data, from 1980 to 2010 and simulated data by the global model MIROC5 nestled with the Eta regional model, for the future until 2050. The first paper aims to detect analyze variability and precipitation trend in Paraná. Non-parametric tests were applied to detect precipitation trends as well as compare data from historical series with future data. The results have called the researcher's attention due to the great variability and significant changes in the average monthly precipitation that can occurred in the studied State. Secondly, the extreme drought theme was approached based on the historical series from 1980 to 2015. The second paper aims to analyze variability and future scenarios of drought in Paraná State, using the standardized drought index. The results show that, although there is an increasing trend of precipitation in the State, there is also a change concerning the drought scenario, which warns of a possible decrease in water availability, especially in the Metropolitan mesoregion. Changes in water resources management policies would be interesting to help future mitigation actions of this phenomenon.

Index terms: variability of precipitation, precipitation deficits, climate changes, standardized drought index, future scenarios.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE FIGURAS	xvi
APRESENTAÇÃO GERAL DA TESE	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Definições	4
3.2 Breves análises sobre a seca no mundo e no Brasil.....	6
3.3 Índices de determinação de seca	8
3.4 Comportamento da precipitação.....	12
3.5 Mudanças climáticas	15
3.6 Modelos climáticos globais e regionais.....	19
REFERÊNCIAS.....	26
ARTIGO 1: TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO PARANÁ: CLIMA PRESENTE E FUTURO	32
1 INTRODUÇÃO	32
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	46
ARTIGO 2 CENÁRIOS DE SECA METEOROLÓGICA NO ESTADO DO PARANÁ: PASSADO E FUTURO	48
INTRODUÇÃO	48

MATERIAL E MÉTODOS.....	50
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
APÊNDICES.....	69

LISTA DE TABELAS

TABELAS DA PARTE GERAL

Tabela 1	Definições dos diferentes tipos de seca.....	5
Tabela 2	Índices de determinação de seca	9
Tabela 3	Características da precipitação.....	13
Tabela 4	Lista dos principais modelos climáticos globais utilizados.....	21

TABELAS DO ARTIGO 1

Tabela 1	Informações das estações pluviométricas e dos pontos dados futuros pelo cenário RCP 4.5 Eta/Miroc5	35
Tabela 2	Testes estatísticos de tendência de precipitação para o estado do Paraná	39

TABELAS DO ARTIGO 2

Tabela 1	Quantidade de estações pluviométricas por mesorregião.....	51
Tabela 2	Definições de valores e classes do SPI	54
Tabela 3	Métodos de suavização exponencial	55
Tabela 4	Meses com maiores secas severas e extremas no período de 1980-2015	56
Tabela 5	Ajuste do modelo ideal utilizando ETS para séries históricas e futuras de secas severas e extremas e verificação do modelo pelo teste Ljung-Box.....	57
Tabela 6	Teste de Shapiro Wilk e correlação de Pearson	61

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS DA PARTE GERAL

Figura 1	Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca.	6
Figura 2	Concentração dos principais gases do efeito estufa.	20
Figura 3	Consumo de energia primária, de petróleo e os diferentes usos de energias. ...	20
Figura 4	Distribuição dos pontos de massa h e velocidade v na grade E.....	22
Figura 5	Grade regular vertical e horizontal do modelo Eta.	23
Figura 6	Domínio do modelo Eta.	24

FIGURAS DO ARTIGO 1

Figura 1	a) Distribuição espacial das 24 estações pluviométricas no estado do Paraná; b) Grid do modelo Eta/MIROC5 com 824 pixels cobrindo o estado do Paraná. .	34
Figura 2	Distribuição espacial das 24 estações pluviométricas no estado do Paraná e os dados futuros simulados com o modelo Eta/MIROC.....	35
Figura 3	Distribuição espacial dos pontos estudados mostrando as tendências de aumento, diminuição ou estabilidade da precipitação, para o período de 1980-2050.	41
Figura 4	Variação temporal nos pontos onde mostram mudanças de tendências de precipitação durante o período 1980-2050, juntamente com a média de precipitação histórica e futura.	44

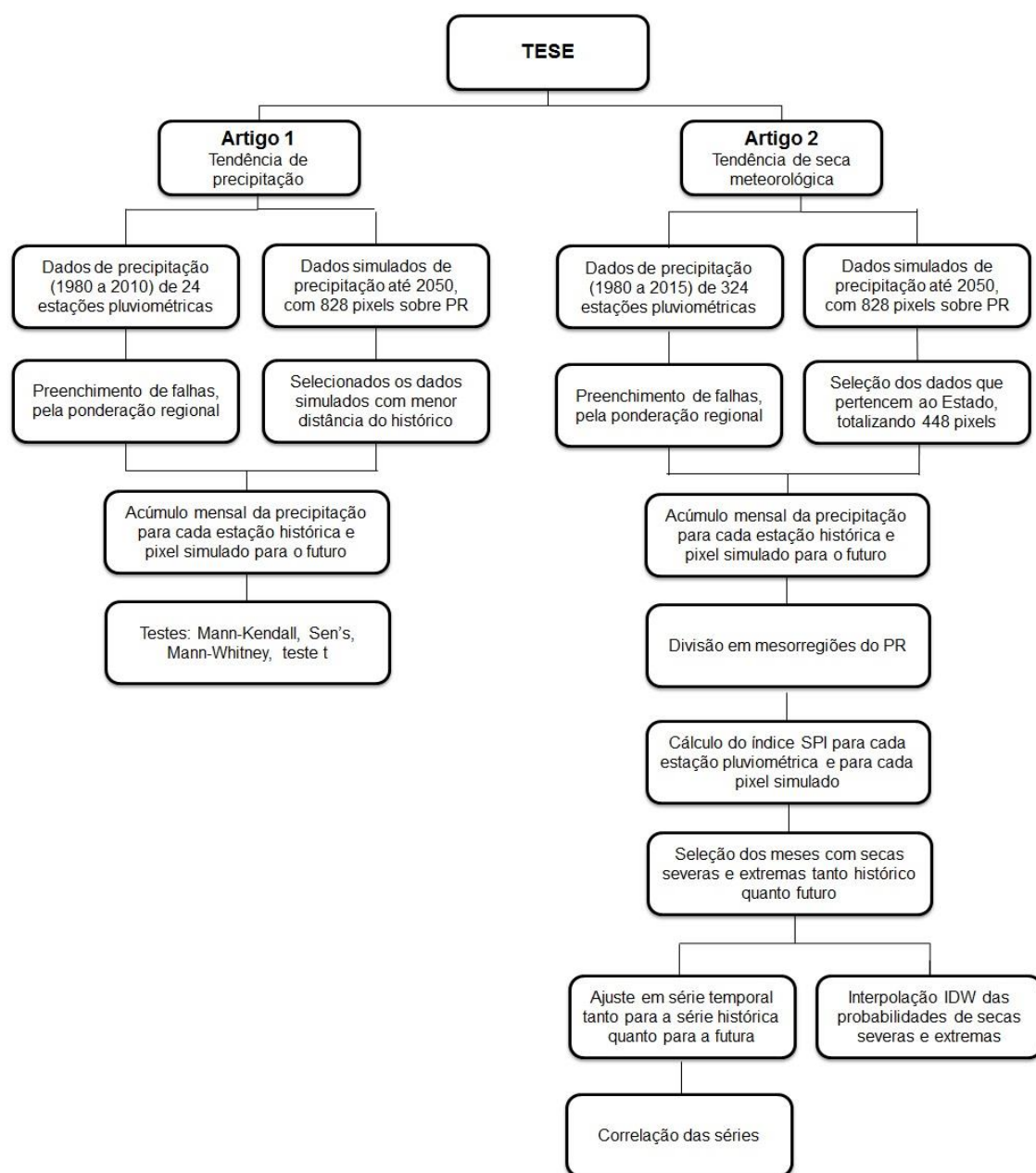
FIGURAS DO ARTIGO 2

Figura 1	Distribuição normal e os índices SPI.	49
Figura 2	Representação espacial das estações pluviométricas no estado do Paraná.	51
Figura 3	Pontos de estimativa de dados futuros simulados pelo Eta/MIROC5 para o estado do Paraná.	52

Figura 4	Gráficos da série temporal considerando os eventos ocorridos de seca extrema e severa para o período de 1980 a 2015, para todas as mesorregiões do Paraná e para cada mês desse período.	58
Figura 5	Gráficos da série temporal considerando a possibilidade de frequência de seca extrema e severa para todas as mesorregiões do Paraná para o período de 2017 a 2050 e para cada mês desse período.....	60
Figura 6	Ocorrência de seca severa e extrema em porcentagem para o período de 1980-2015 sobre o estado do Paraná.....	62
Figura 7	Probabilidade de ocorrência futura de seca severa e extrema para o período de 2017-2050 sobre o estado do Paraná.....	63

APRESENTAÇÃO GERAL DA TESE

A seleção do tema seca ocorreu com o intuito de continuar o estudo de extremos climáticos, já que no mestrado estudei sobre chuvas intensas. Para entender sobre o tema seca, os resultados foram apresentados na forma de artigos científicos. O fluxograma do desenvolvimento é apresentado a seguir.



Fluxograma do desenvolvimento da tese.

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade climática tem feito crescer, nos últimos anos, a preocupação com a seca em todo o mundo. Segundo Quiring (2009), a variabilidade é uma característica normal e periódica do clima, mas que causa prejuízos entre os diversos setores da atividade humana, sendo difícil de detectar o seu início e a monitoração correta.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), no seu quarto relatório de avaliação, afirma que o mundo de fato foi mais propenso à seca durante os últimos 25 anos. O monitoramento da área afetada pela seca e sua quantificação é uma informação importante para o manejo e o gerenciamento desse tipo de desastre natural. Mesmo ocorrendo várias incertezas em relação às condições climáticas, qualquer ferramenta que auxilie o processo decisório é de grande importância às várias esferas da vida humana, seja em questões de natureza comercial, ambiental, agrícola ou outras.

Diante desses fatos, aumenta a necessidade de serem desenvolvidas estratégias de gestão dos recursos hídricos, baseadas em conhecimentos científicos para gerir os riscos e mitigar os efeitos das secas. Alguns países têm se preocupado de uma maneira tão intensa com o evento climático da seca, que criaram comissões ou organizações que monitoram esse evento. Canadá, México e Estados Unidos participam de um programa denominado *North America Drought Monitor* (NADM), pelo qual monitoram a seca em todo o continente em uma base contínua, fornecendo uma avaliação abrangente e integrada do clima em curso nos três países. Esse programa foi baseado no *US Drought Monitor* (USDM), que tem como objetivo avaliar e comunicar o estado de seca nos Estados Unidos, em base semanal.

Na Europa, o *Drought Management Centre for Southeastern Europe* (DMCSEE) tem a missão de coordenar e facilitar o desenvolvimento, avaliação e aplicação de ferramentas de gestão de risco de seca e políticas no Sudeste da Europa, com o objetivo de estar preparado para as ocorrências de seca e, assim, reduzir seus impactos. Já o centro de investigação *European Drought Observatory* (EDO) concentra vários dados relevantes, tais como mapas de indicadores derivados de diferentes fontes, feitos por diversas instituições e que permitem visualizar e analisar as informações, oferecendo uma visão geral da situação, em caso de secas iminentes.

No continente Africano quem monitora a seca é um grupo de hidrologia pertencente ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Princeton apoiado pelo programa internacional de hidrologia da UNESCO. O *Bureau of Meteorology* é um serviço nacional da

Austrália responsável pelo monitoramento de secas, inundações, tempestades, tsunamis, ou seja, monitoram os eventos extremos no país.

No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) disponibiliza um monitoramento de seca pelo Índice de Precipitação Padronizados (SPI), utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), de estações automáticas e convencionais e dados do próprio INPE.

No que diz respeito ao estado do Paraná, são utilizados nesta pesquisa dados do Inmet e do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar). Sobre essas estações automáticas do Inmet, as mais antigas começaram a funcionar em 2006, e para um estudo confiável, a metodologia do SPI pede uma série de no mínimo 30 anos de dados. Em relação às estações convencionais, os dados têm mais de 30 anos, mas há apenas 8 estações no Estado, sendo que 2 estão localizadas no Norte Central, 1 no Centro-Occidental, 2 no Sudeste, 1 na região Centro-Oriental e 2 na região Metropolitana de Curitiba, portanto as mesorregiões Oeste, Sudoeste, Noroeste, Centro-Sul e Norte Pioneiro não são contempladas. Logo, além de poucas estações, as mesmas não estão distribuídas de uma maneira adequada no Estado. Em relação aos dados do INPE, todos provêm de estações automáticas e a mais antiga foi instalada no ano de 2000.

Em relação à seca, o governo brasileiro se preocupa muito mais com ações corretivas do que preventivas. São feitos altos investimentos em ações emergenciais como operação carro pipa, bolsa estiagem, construção de cisternas, microaçudes, mas todas essas ações são subsídios que minimizam o problema, muitas vezes somente em curto prazo. Talvez, se houvesse um estudo quanto ao retorno da causa, ele auxiliaria no planejamento ou em medidas de mitigação mais precisas frente a esse evento climático.

Apesar de os maiores problemas, em relação à falta de chuva estarem concentrados no Nordeste do Brasil, a região Sul já sofreu diversas vezes a consequência de períodos sem chuva. Muitas vezes, o problema se agrava pelo fato de a formação geológica da região ser de basalto e do relevo ser bastante acidentado, pois, quando o volume de água reduz os rios secam rapidamente, ficando sem capacidade de manutenção de uma vazão que atenda os usos da água.

O estudo de eventos extremos tem importância independentemente do local, pois seus efeitos podem acontecer em qualquer estação e seus impactos variam com a atividade. Nesse contexto, o objetivo estabelecido para essa pesquisa foi o de obter uma melhor compreensão da variabilidade da precipitação sobre o estado do Paraná, identificar a ocorrência de secas meteorológicas e apontar futuros cenários desse evento climático sobre o Estado, com o intuito de fornecer elementos para futuras ações de planejamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a variação temporal e espacial da seca meteorológica no estado do Paraná, no presente e no futuro.

2.2 Objetivos específicos

- Compreender a variabilidade da precipitação no estado do Paraná de 1980-2010.
- Simular a frequência, duração e intensidade das secas para o futuro (2017 a 2050) para o estado do Paraná.
- Analisar a variação espacial e temporal das secas no período de 1980 a 2015 no estado do Paraná.
- Identificar tendências de precipitação até 2050 sobre o Estado.
- Analisar as possíveis mudanças nas características das secas para o futuro (2017 a 2050) em comparação com o período base (1980 a 2015).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definições

As dificuldades associadas à mitigação e combate dos efeitos da seca têm início desde o estabelecimento de uma definição clara do termo seca, até o conhecimento da vulnerabilidade que cada atividade, região ou sociedade apresenta em relação a essa condição climática adversa (BLAIN; KAYANO, 2011). A seca pode ocorrer em qualquer região sem diferenciação de clima, pois mesmo em um clima com características predominantemente úmidas esse fenômeno pode se manifestar (TEIXEIRA et al., 2013).

Segundo Mishra e Singh (2010), a compreensão dos diferentes tipos de secas serão úteis para o desenvolvimento de modelos em diferentes cenários de seca globais. A falta de concepção desse fenômeno natural pode resultar em falta de entendimento das reais implicações sociais de uma seca, tornando ineficazes as medidas de combate a essa anomalia climática (BLAIN; BRUNINI, 2006).

Para o *World Meteorological Organization* (WMO) e o *Global Water Partnership* (GWP) (WMO/ GWP, 2011), um fator que distingue a seca de outros desastres naturais é a ausência de um reconhecimento preciso e universalmente aceito de condições de seca. É um evento temporário, diferente da aridez que é uma característica permanente do clima.

Estiagem e seca são comumente tratadas de forma indiferenciada, mas, de acordo com Gutiérrez, et al. (2014), há uma distinção técnica importante entre esses dois conceitos: a estiagem está relacionada com a redução das chuvas, o atraso dos períodos chuvosos ou a falta de chuvas previstas para uma determinada época; seca, que do ponto de vista meteorológico, é uma estiagem prolongada, caracterizada por uma redução sustentada das reservas de água existentes. Para Espíndola e Nodari (2012), a estiagem pode ser entendida como um evento relativamente prolongado, embora temporário, geralmente relacionado a baixos índices de precipitação pluviométrica, que desequilibram a reposição da umidade do solo, necessária para a manutenção do sociometabolismo costumeiro das populações atingidas, causando séria instabilidade hidrológica, afetando tanto seus ecossistemas quanto as comunidades e atividades econômicas que nele se desenvolvem.

Em relação à desertificação, o seu significado foi instituído na assembleia geral da *United Nations* (1994) e corresponde a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e

sub-húmidas secas, como resultado da influência de vários fatores, incluindo as variações climáticas e as atividades humanas.

É necessário decidir exatamente o significado do termo seca antes que qualquer proposta de análise seja desenvolvida ou utilizada, entretanto, estabelecer uma definição universal desse evento tem se mostrado uma tarefa difícil de realizar. Wilhite e Glantz (1985) fizeram um estudo de discussão e revisão em mais de 150 publicações de definições de seca e distinguiram quatro tipos: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. Essa importante pesquisa disciplinou as discussões sobre esse fenômeno e a visão geral dos diferentes tipos de seca, classificando-a em quatro diferentes categorias, que vêm sendo usadas pela comunidade científica desde então. A Tabela 1 contém essas definições.

Tabela 1 Definições dos diferentes tipos de seca

Seca Meteorológica	Deficit de precipitação durante um período seco comparado a algum estado "normal", caracterizando-se pelo desequilíbrio entre a precipitação e evapotranspiração
Seca Agrícola	Deficit na umidade do solo que não permite satisfazer as necessidades de crescimento de uma dada cultura em qualquer das suas fases de crescimento
Seca Hidrológica	Deficit no volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios
Seca Socioeconômica	Consequência dos demais tipos de seca. É o desequilíbrio entre o fornecimento e a demanda e que afeta diretamente a população

Fonte: Wilhite e Glantz (1985).

De acordo com Fleig et al. (2006), a escolha adequada da distinção dos tipos de seca para um estudo específico, depende das características hidrológicas e climáticas da região. A seca pode ser inicialmente meteorológica e, depois disso, tornar-se uma seca agrícola e progredir para uma seca hidrológica. Uma análise nos padrões da seca meteorológica pode dar informações sobre o início de estágios de seca.

A avaliação da seca quer do ponto de vista agrônomo ou meteorológico depende da análise de séries longas de precipitação e os possíveis efeitos destas anomalias sobre o ecossistema e a população (BRUNINI et al., 2002).

A definição do estado de seca é algo muito importante para o estabelecimento de uma política necessária ao planejamento e mitigação deste fenômeno, pois alerta para ações seguras como restrições da disponibilidade de água para usuários e atuação do governo para programas de combate (NDPC, 2000 citado por ALBUQUERQUE 2010).

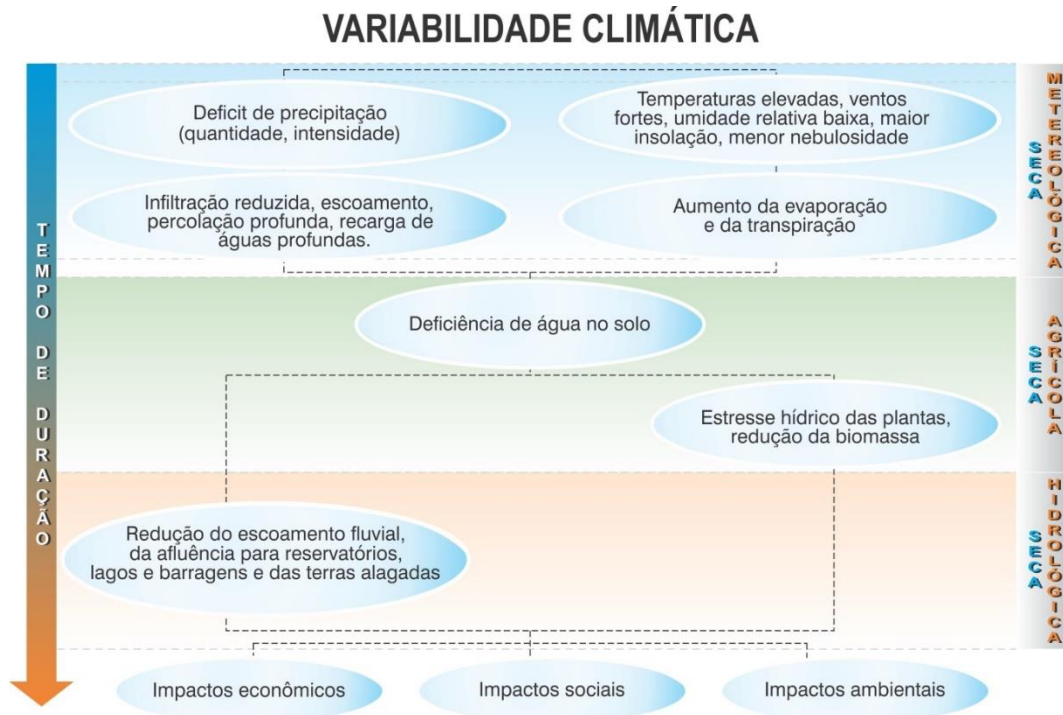


Figura 1 Esquema da sequência temporal dos diversos tipos de seca.

Fonte: Adaptado do *National Drought Mitigation Center*. (FONTE?).

3.2 Breves análises sobre a seca no mundo e no Brasil

Segundo Bogardi e Warner (2009), a seca, a desertificação e outras formas de falta da água afetam até um terço da população mundial. A seca é considerada um dos piores riscos-naturais e tem impacto maior sobre países que possuem economias emergentes. A vulnerabilidade desses países está progredindo cada vez mais com o crescente aumento da população (LANEN et al., 2013). Segundo Seneviratne et al. (2012), provavelmente, a seca vai piorar em muitas partes do mundo por causa das mudanças climáticas. Por suas consequências, as secas são reconhecidas como um desastre ambiental, logo têm atraído a atenção de ambientalistas, ecologistas, hidrólogos, meteorologistas, geólogos e cientistas agrícolas (MISHRA; SINGH, 2010).

A seca não pode ser vista somente como um evento climático extremo, mas também como um processo hidrológico dinâmico, com consequências sociais provocadas pela escassez de água. Para estabelecer uma comparação, cabe a análise de dois exemplos distintos. No primeiro deles, no oeste dos Estados Unidos, a neve se acumula durante o inverno nas montanhas rochosas e, após o degelo, essa água serve para irrigação de

culturas durante o verão. Nesse caso, a seca não provoca impactos tão significativos, pois o abastecimento de água, agricultura, produtos e alimentos estão garantidos (SMITH, 2013). No segundo caso, meio bilhão de pessoas em regiões da China e Índia são anualmente expostas à seca, sem outra fonte de abastecimento, afetando seriamente o desenvolvimento econômico e o meio ambiente (LANEN et al., 2013).

Porém, outras regiões do mundo também são afetadas. O Tajiquistão, país localizado na Ásia Central, experimentou um inverno excepcionalmente grave no final de 2007, levando à escassez de eletricidade, água e perdas de alimentos. Esses impactos coincidiram com a seca, o que levou a um aumento dramático dos preços dos alimentos e, por consequência, uma insegurança alimentar.

Nas últimas décadas, o continente Africano é o que mais sofreu com o impacto da seca, nesse continente o evento ocorre com considerável frequência. Conforme o *International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)* (2009), em média, mais de 30% da população africana estão expostas a seca todos os anos e o modo de vida das pessoas está seriamente afetado.

A Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação - UNCCD (2014) levantou alguns dados interessantes sobre as secas que ocorreram no mundo nos últimos tempos. Em 2011, a França sofreu seu ano mais seco em 50 anos, a agricultura foi afetada, a produção de energia hidroelétrica caiu mais de 20%. Nesse mesmo ano, o nordeste da África sofreu uma de suas piores secas, afetando 13 milhões de pessoas, incluindo 4,5 milhões de pessoas da Etiópia e 4 milhões de pessoas no Quênia. O custo desse evento climático para o Quênia foi estimado em 17% do seu Produto Interno Bruto. A Itália sofreu seis secas nos últimos 10 anos, incluindo o norte da Itália que, devido às águas subterrâneas dos Alpes, tem, em grande parte, um dos mais altos índices de disponibilidade anual de água na Europa. Em 2012, os Estados Unidos sofreu com a maior seca dos últimos 50 anos, 10% da safra americana de milho e de soja foram perdidas, o que equivale a 130 milhões de toneladas. Em 2013, o Nordeste Brasileiro viveu a pior seca dos últimos 50 anos.

Segundo Albuquerque (2010), no Brasil a gestão da seca sempre foi, e continua sendo, considerada uma gestão de crises, em que as ações realizadas são respostas ao fenômeno já consolidado. Poucos foram os avanços associados à política de secas, pois o nordeste Brasileiro continua sofrendo com impactos relacionados a esse fenômeno. A pior estiagem dos últimos 50 anos, ocorrida na Amazônia em 2005, e os eventos de seca acontecidos em 2004 e 2006, na região sul, podem indicar o aumento na frequência de secas em nosso país.

Regiões úmidas, como a Floresta Amazônica, no estado do Amazonas, e a região dos Pampas, no Rio Grande do Sul, têm experimentado períodos de seca severa durante os últimos anos (TEIXEIRA et al., 2013).

Apesar dos períodos de secas ocasionarem menores danos humanos diretos, quando comparados com os danos provocados pela chuva forte, os prejuízos econômicos e sociais são grandes, pois esse tipo de desastre tem efeitos prolongados sobre a sociedade, devido, por exemplo, à perda de colheitas e à dificuldade para pagar os financiamentos realizados para investimento em sementes e fertilizantes. Na maioria dos casos, a produção agrícola se revela como única fonte de renda dos afetados, o que faz com que os efeitos do desastre reverberem no tempo (BATISTA JUNIOR, 2012).

No ano de 2001, houve um racionamento de energia elétrica, devido ao baixo nível dos reservatórios ocorrido em várias regiões do Brasil, e esse foi mais um exemplo um exemplo da vulnerabilidade da sociedade brasileira a essa anomalia climática (BLAIN, 2005).

Em 2014-2015, o estado de São Paulo, vivenciou uma das maiores secas de sua história. A combinação de baixos índices pluviométricos, principalmente durante os verões de 2013-2014 e 2014-2015, o grande crescimento de demanda pela água, a ausência de planejamento adequado para o gerenciamento dos recursos hídricos e a ausência de uma consciência coletiva dos consumidores brasileiros para o uso racional da água têm gerado a denominada “crise hídrica”. O complexo do Cantareira que abastece 8,8 milhões de pessoas atingiu a menor marca da história, algumas cidades foram forçadas a depender de caminhões pipa. A seca também teve impactos socioeconômicos, principalmente nas áreas que exploram o turismo e lazer às margens de rios e represas, assim como aumentos nos preços dos alimentos e nas tarifas de energia em residências, indústrias e comércios. Esses impactos são compatíveis com a significativa falta de preparação diante do atual quadro de variabilidade climática, que requer maior ênfase na implementação de medidas de mitigação e adaptação para diminuir a vulnerabilidade da população atingida por secas (MARENGO et al., 2015).

3.3 Índices de determinação de seca

É necessário que haja algum padrão numérico para comparação dos índices de seca de uma região para outra e para comparação de eventos climáticos passados de ocorrência

desse fenômeno, mas a discordância que existe sobre a definição de seca torna impossível conceber um índice universal. Devido a essa complexidade, não há um índice único capaz de capturar adequadamente a intensidade, a gravidade e os impactos da seca sobre um grupo tão diversificado de usuários (HEIM, 2002).

Batista Junior (2012) afirma que os índices de seca variam em grau de complexidade, desde uma simples medida de seca meteorológica tal como os desvios de precipitação em relação a sua média climatológica, até modelos paramétricos de relação água - planta, os quais incorporam as condições de umidade do solo e o manejo do uso da terra para áreas climatologicamente homogêneas.

Na Tabela 2 são apresentados, de modo resumido, os índices de seca mais utilizados.

Tabela 2 Índices de determinação de seca

Continua

Índice	Ano de criação	Parâmetro de entrada	Secas	Prós - Contras
Índice de severidade de seca de Palmer (PDSI)	1965	P, T	M, A	Prós: é um índice mais complexo pelo fato de ter como entrada precipitação e temperatura e considerar a umidade do solo (pelo balanço hídrico de Thornwaite e Mather). Contras: Palmer desenvolveu o índice para indicar seca meteorológica, mas sem especificar a escala de tempo e o uso de regras arbitrárias para definir o início e o fim da seca.
Índice de anomalia de chuva (RAI)	1965	P	M	Prós: estudos comparativos entre o RAI, o PDSI e o BMDI indicaram diferenças insignificantes entre os três índices. Contras: o indicativo de ano seco, nem sempre garante a ausência de cheias em uma região estudada.
Índice de severidade de Herbst (HSI)	1966	P	M	Prós: o HSI é uma ferramenta que melhor se aplica em locais que tenham secas de longos períodos, como o nordeste brasileiro. Contras: como o total de precipitação varia de ano a ano, espera-se que as culturas típicas estejam ajustadas à variabilidade média de precipitação.
Decis (D)	1967	P	M	Prós: as vantagens são os dados e requisitos mais simples, quando comparado com o PDSI. Divide-se a série em 10 partes iguais e crescentes, o 1º decil corresponde aos valores da precipitação que não excedam os 10% dos valores mais baixos e assim por diante, portanto, os cálculos são de baixa complexidade. Contras: exige no mínimo 30 anos de registro de dados

Conclusão

Índice	Ano de criação	Parâmetro de entrada	Secas	Prós - Contras
Índice de umidade de cultura (CMI)	1968	P, T	A	Prós: identifica potenciais secas agrícolas em período semanal Contras: não é eficiente na monitoração à longo prazo da seca, pois sua resposta rápida para mudanças a curto prazo fornece informações errôneas a longo prazo, porquanto uma precipitação no meio de uma seca pode indicar umidade adequada, enquanto a seca em longo prazo persiste no local, além de que o CMI pode não ser aplicável durante a fase de germinação da semente.
Índice de seca de Bhalme & Mooley (BMDI)	1980	P	M	Prós: uma parte do algoritmo de Palmer (PDSI) foi substituída por um índice mais simples de precipitação mensal, calculado somente com dados de precipitação. Contras: como é baseado no balanço hídrico local, é válido somente com solos de composição física idêntica.
Índice de estresse hídrico da cultura (CWSI)	1982	P, T, US	A	Prós: método baseado na relação entre evapotranspiração real e a potencial e também na água disponível do solo. Vários autores enfatizam o uso do CWSI em programas de irrigação e monitoramento de estresse hídrico de culturas em regiões áridas. Contras: a falta de dados históricos de umidade de solo.
Índice padronizado de precipitação (SPI)	1993	P	M	Prós: o SPI pode ser calculado para diferentes escalas de tempo. Possibilita a comparação de precipitação entre diferentes regiões. Contras: conhecimento prévio da climatologia da região é necessário, pois regiões com baixos valores de precipitação podem resultar enganosamente grandes valores.
Índice de seca efetiva (EDI)	1999	P, T, US	M, A	Prós: o índice é calculado em escala diária e é uma função da precipitação necessária, ou seja, que está faltando para retornar para as condições normais (climatológicas). Os valores de EDI são normalizados, podendo comparar secas de diversas localidades. Contras: utiliza dados diários de precipitação, porém, muitas vezes, esses dados não estão disponíveis para as regiões que se pretende estudar.

Índice de
porcentagem
normal (PN)

-

P

M

Prós: um simples cálculo: precipitação atual dividido pela precipitação anual. Pode ser calculado em diversas escalas de tempo.

Contras: a precipitação não segue uma distribuição normal. Há uma diferença entre a média e a mediana.

Notas: P = precipitação; T = temperatura; US - umidade do solo; M = seca meteorológica; A = seca agrícola.

Fonte: Adaptado de Fernandes et al. (2009).

O PDSI é o índice mais antigo e mais conhecido, mas o SPI é o mais usado para a compreensão da magnitude e duração dos eventos de seca. A maioria dos pesquisadores o utiliza, mas faz a ressalva de que é útil consultar um ou mais índices, antes de tomar uma decisão. Alertam que é importante saber os benefícios e as limitações de cada índice, a fim de decidir qual é o mais útil para qualquer aplicação em particular (HAYES; ALVORD; LOWREY, 2007).

Segundo Hayes et al. (2011), em dezembro de 2009, especialistas de seca de 22 países se reuniram para discutir o desenvolvimento de normas e diretrizes de avisos prévios de seca e chegaram a um consenso de que a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), deve recomendar o SPI para uso padrão em países que querem monitorar a seca meteorológica. Em relação a seca hidrológica e agrícola, não chegaram a um acordo. Portanto, a partir dessa reunião a OMM recomenda a todos os países o uso do SPI para monitorar a seca hidrológica.

Altamirano (2010) cita 3 vantagens e 3 desvantagens para o uso do SPI. As vantagens são:

- simplicidade, pois depende somente de dados de precipitação;
- monitoração de períodos secos ou chuvosos sobre uma ampla escala de tempo;
- padronização que garante que a frequência de eventos extremos em qualquer local e qualquer escala de tempo são consistentes.

As desvantagens são:

- a quantidade e a confiabilidade de dados que são necessários para ajustar a distribuição;
- a padronização em si, pois o SPI não pode identificar regiões que podem ser “mais propensas” à seca do que outras;
- quando se aplica o SPI em curta escala de tempo, em regiões de baixa precipitação sazonal, ele pode apresentar resultados enganosos com grandes valores de SPI positivos ou negativos.

Apesar de ter sua origem nos EUA, o SPI tem sido empregado com frequência por pesquisadores em vários países todo mundo: África, Argentina, Canadá, Chile, China, Cuba, Espanha, Grécia, Honduras, Hungria, Índia, Iran, Itália, Coréia e leste da Ásia, México, Polônia, Portugal, Peru, Rússia, Tailândia e Turquia (ALTAMIRANO, 2010), inclusive o Brasil.

3.4 Comportamento da precipitação

A distribuição da precipitação ao longo do território brasileiro apresenta grande variabilidade espacial e temporal. No verão é caracterizada pela forte convecção que ocorre sobre a Amazônia e Brasil Central, estendendo-se para sudeste quando há presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Já, para o sul do Brasil, as chuvas no inverno são consideráveis. Porém, essas características sazonais da precipitação podem ser alteradas quando ocorre o fenômeno *El Niño*/Oscilação do Sul (ENOS), por exemplo, ocasionando eventos extremos de precipitação: excessos ou deficit (ALTAMIRANO, 2010).

Silva et al. (2010), analisando séries temporais de precipitação de todo o Brasil para o período 1961 a 2008, encontraram padrões diferenciados e muito regionalizados nas tendências de aumento e diminuição das precipitações. Reboita et al. (2010) fizeram um estudo sobre regimes de precipitação na América do Sul e obtiveram as características de precipitação em relação ao Brasil e sua fronteira (Tabela 3).

Em relação à precipitação do Sul do Brasil, Pinheiro, Graciano e Severo (2013) analisaram séries temporais diárias, mensais e anuais de 18 estações pluviométricas, com dados superiores a 50 anos, sendo 8 localizadas no Paraná, 5 em Santa Catarina e 5 no Rio Grande do Sul. As análises das séries mensais e anuais evidenciaram tendências estatisticamente significativas, a 5% de significância, de aumento dos totais precipitados para o período analisado. O mês de janeiro apresentou tendência de aumento em todas as estações pluviométricas do Paraná, exceto na estação de Foz do Iguaçu. Todas as estações de Santa Catarina apresentaram tendência positiva; três estações do Rio Grande do Sul apresentaram tendência positiva e duas apresentaram tendência de decréscimo das precipitações. Vale ressaltar que, pelo tamanho da área, utilizaram-se poucas estações pluviométricas nesse estudo e as mesmas estavam mal distribuídas espacialmente.

Tabela 3 Características da precipitação

Região	Características do Ciclo Anual de Precipitação
Sul do Brasil, Sul do Paraguai e Uruguai	A precipitação é praticamente homogênea ao longo do ano. O total anual é elevado (1050- 1750 mm/ano), sendo ainda maior no oeste do sul do Brasil na fronteira com o Paraguai (1750-2100 mm/ano).
Noroeste a Sudeste do Brasil, Equador e Norte do Peru	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno. O total anual varia ao longo dessa região: no setor norte é superior a ~2450 mm e no centro-oeste e sudeste é de ~1500 mm.
Norte da Região Norte do Brasil e litoral do Nordeste do Brasil	Máximos de precipitação no primeiro semestre do ano. Ao norte da região Norte do Brasil o total anual é de 2000 mm, enquanto no litoral do Nordeste do Brasil é de 1500 mm.
Sertão Nordestino do Brasil	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno, mas os totais são reduzidos (entre 200 e 500 mm/ano).

Fonte: Reboita et al. (2010).

Pampuch e Ferraz (2012) estudaram padrões espaciais e temporais que influenciam a precipitação no Sul do Brasil. Utilizando dados diários disponibilizados pelo *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA), para o período de 01/03/1982 a 31/05/2006 e encontraram 108 eventos secos e 135 eventos chuvosos. Os eventos secos se apresentaram mais curtos (4 dias) e os eventos chuvosos mais longos (6 dias). O outono se apresentou como a estação de maior ocorrência de eventos secos e os eventos chuvosos ocorreram bem distribuídos durante o ano.

Durante a seca registrada no verão de 2004-2005, na região Sul do Brasil, houve uma imensa variabilidade de precipitação. Em 2005, o total de chuva anual, superou a média no estado de Santa Catarina, porém setores leste e noroeste do Rio Grande do Sul e litoral e sul do Paraná experimentaram quedas nos índices pluviométricos. Todo o Sul passou por um período crítico de deficit de precipitação durante os meses de dezembro/2004 a março/2005. Nesse período, o total acumulado de chuva esteve entre 100 mm e 500 mm, abaixo da média histórica. Essa seca causou a maior quebra de safra agrícola da história. O Estado mais prejudicado foi o Rio Grande do Sul, com perda de 66,7% (6,1 milhões de toneladas) da produção estimada em dezembro de 2006, seguido do Paraná com 13,3% (1,63 milhão de toneladas) e do Mato Grosso do Sul com 20,9% (1,051 milhão de toneladas). A soja lidera a lista de culturas mais prejudicadas pela seca (MARENGO, 2007).

Sobre a precipitação média diária observada no período 1979-2002, mostraram que o máximo anual ocorre no noroeste de Santa Catarina e sudoeste do Paraná, com valores

superiores a 2100 mm, enquanto que os menores valores são observados no extremo norte do Paraná e no extremo sul do Rio Grande do Sul, com valores inferiores a 1500 mm. Durante o verão, o sul do Rio Grande do Sul é a região que recebe menos chuva (menos de 400 mm), enquanto que, no leste de Santa Catarina e leste do Paraná a precipitação supera 600 mm. Os eventos secos são mais frequentes no mês de agosto no sudeste do Paraná, oeste de Santa Catarina e norte e centro-oeste do Rio Grande do Sul (SEVERO; GAN, 2004).

Em relação ao Paraná, Nery e Carfan (2012) concluíram que a variabilidade da chuva é tanto espacial quanto temporal, sendo que chove mais ao Sul e a Leste e menos ao Norte e Noroeste do Estado. Minuzzi, Caramori (2011) também notaram que a região leste do Paraná tem tendência crescente de chuva, mas também observaram esse aumento para eventuais áreas do sudoeste do Paraná.

Em relação à temperatura, houve uma mudança de variabilidade no início da década de 2000, em relação à temperatura máxima no estado do Paraná, principalmente no outono e na escala anual, mas a irregularidade da distribuição espacial das estações meteorológicas, impede de definir as regiões do Estado mais propícias a essa variabilidade. Na primavera e, principalmente, na escala anual, há uma tendência de aumento da temperatura do ar, com um aumento entre 0,3 °C e 0,6 °C/década na primavera e entre 0,1°C e 0,4°C/década na escala anual (MINUZZI; CARAMORI; BORROZINO, 2011).

Chang et al. (2012) utilizaram o modelo Eta para fazer uma projeção climática para o estado do Paraná. A previsão foi para um cenário pessimista no período de 2041 a 2070. Dos 399 municípios paranaenses, 233 (58%) apresentaram nota do índice de cenário climático maior ou igual a 0,8 (numa escala de 0 a 1); isso significa que esses municípios são considerados potencialmente críticos para uma de três anomalias: pluviosidade, estresse hídrico ou temperatura. Entre esses, 43 municípios (11%) apresentaram grau de anomalia maior ou igual a 0,9. Com relação à projeção da anomalia de estresse hídrico, observa-se que os municípios mais suscetíveis no período futuro se concentram na faixa Nordeste (Norte velho) e parte do Centro-Sul do Estado. Também há municípios na região Centro-Sul que poderão ser afetados tanto pela anomalia de pluviosidade quanto pela anomalia de estresse hídrico.

3.5 Mudanças climáticas

A mudança climática global começou a ser discutida no final da década de 1980, no âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e da Organização Meteorológica Mundial, com o apoio dos estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) (ADAM, 2011).

Segundo o *International Water Management Institute* - IWMI (2014), a mudança climática está causando mais eventos climáticos extremos, como inundações e secas, interrompendo a produção agrícola e destruindo infraestrutura, causando danos no valor de milhares de milhões de dólares anualmente. Também está aumentando a variabilidade climática, como exemplo, podemos citar o atraso no início das estações molhadas. O planejamento eficaz é essencial para aumentar a resiliência e reduzir os riscos sociais e econômicos relacionados com os meios de subsistência e sistemas ambientais.

A mudança do clima é caracterizada pela instabilidade de variáveis climáticas, tanto em valores médios e extremos como na forma de sua distribuição estatística. Médias anuais e sazonais de longo prazo de variáveis climáticas, especialmente a temperatura e a precipitação, em geral, têm sido utilizadas como indicadores para a avaliação das alterações climáticas. Pequenas mudanças no seu meio podem ser associadas a grandes mudanças na frequência de extremos, devido a mudanças na variabilidade (SANTOS, 2014).

Sabe-se que a variabilidade climática é um processo natural que pode ser identificada através de observações de séries históricas de variáveis do clima como a temperatura e a precipitação (ADAM, 2011). Porém, desde 1970, houve um aumento de 31% da concentração de gás carbônico na atmosfera, no período entre 1880 a 2012, por consequência, a temperatura da Terra sofreu um acréscimo de 0,85°C, assim, a atmosfera e os mares aqueceram e o gelo e a neve diminuíram e as concentrações de gases do efeito estufa aumentaram. Os últimos registros apontam que os últimos doze anos (2000-2012) estão entre os anos mais quentes desde o início dos registros instrumentais da temperatura da superfície global (IPCC, 2013).

Para o IPCC (2013), se as emissões de gases do efeito estufa continuarem dentro das tendências atuais, o aquecimento global irá aumentar, podendo chegar a 4,8 °C até o ano 2100. Os efeitos negativos se multiplicarão e perturbarão todos os componentes do sistema climático, com graves repercussões sobre o bem estar da humanidade e de todas as outras formas de vida.

As alterações climáticas se refletem nas modificações de variáveis representativas do ciclo hidrológico, tais como precipitação, temperatura e umidade do ar, vento e radiação

solar. Para projetar prováveis alterações climáticas para o futuro, diferentes centros de pesquisa internacionais têm adotado modelos matemáticos que procuram representar o sistema climático global (ADAM, 2011).

Os modelos numéricos avaliam cenários climáticos futuros e, nas últimas décadas, houve uma evolução contínua desses modelos, e esse progresso tem sido impulsionado pelos supercomputadores. O avanço computacional permitiu incluir mais componentes e processos nas simulações e na resolução espacial dos modelos, aumentando assim sua complexidade (MARENGO et al., 2009).

As projeções climáticas futuras são feitas com base em tendências observadas no passado. A precisão dos resultados depende da quantidade e da qualidade dos dados registrados. Diante das projeções constantemente divulgadas quanto às mudanças no clima e seus possíveis impactos no ecossistema, tornam-se necessárias informações e ferramentas cada vez mais precisas, visando aprimorar e atualizar a tomada de decisões (MINUZZI; CARAMORI, 2011).

Algumas regiões do Brasil poderão apresentar alterações na temperatura e precipitação com o aquecimento global. No setor agropecuário, as consequências do aquecimento global serão inúmeras. O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) (2013) identificou as principais mudanças, as quais estão sintetizadas abaixo:

Região Norte:

- o desmatamento na Amazônia intensifica a vulnerabilidade do bioma às mudanças de clima, com isso, a função reguladora do clima global, regional e local que a floresta exerce encontra-se ameaçada;
- a intensificação da estação seca e o atraso no início de estação chuvosa nas regiões do sudeste Amazônico têm 80% de probabilidade de ocorrer;
- caso a frequência de eventos *El Niño* aumente, como consequência do aquecimento global, as florestas emitirão suas grandes reservas de carbono para a atmosfera. O futuro da acumulação de CO₂ depende da contínua absorção de carbono pela biosfera;
- as anomalias de temperatura no Pará irão variar entre 3° a 5°C, em relação às médias de 1961-1990;
- a projeção de clima regionalizada para o bioma Amazônia apresenta para o final do século, redução nas chuvas de 40% a 45% e aumento de 5° a 6°C na temperatura.

Região Nordeste:

- o Nordeste do Brasil é muito vulnerável às mudanças climáticas dadas condições fisiográficas, climáticas e socioeconômicas e deverá sofrer a maior migração populacional para o meio urbano; o setor agrícola nordestino terá uma intensificação dos efeitos migratórios resultantes dos impactos das mudanças climáticas;
- espera-se aumentos nos níveis de temperatura e taxas de evaporação e acentuação de eventos extremos, o que deve gerar impactos significativos nos níveis de reservatórios na região, base do planejamento e gestão dos recursos hídricos;
- estudos apontam favoravelmente para a geração de energia de biomassa e eólica, enquanto a geração de energia hidroelétrica sofreria impactos negativos, devido à sua dependência em relação aos níveis e variações de vazões naturais dos grandes reservatórios, bem como aos níveis elevados de evaporação;
- em ambientes costeiros, estudos preliminares de caráter reflexivo sinalizam recuo da linha de costa da região Nordeste e um aumento da vulnerabilidade de ecossistemas sensíveis a pequenas variações de temperatura como os recifes de corais.

Região Centro-Oeste:

- o Centro-Oeste confronta-se com diversos prognósticos climáticos negativos que preveem que as atividades agrícola e pecuária sofrerão redução de produtividade, devido às mudanças no ciclo hidrológico, aos aumentos de temperatura e à localização estratégica da região, situada nos três biomas de maior importância no país, a Floresta Amazônica, o Cerrado e o Pantanal;
- os resultados de estudos apontam para a redução da vazão em todas as bacias que possuem importantes afluentes no Centro-Oeste (Tocantins/Araguaia; São Francisco; Paraguai; Amazonas) para o período 2071-2100, em relação à média histórica (1961-1990). A única exceção foi a bacia do Paraná, a qual apresentou um aumento de vazão de 11%;
- estudos desenvolvidos pelo INPE e Embrapa sugerem que as temperaturas aumentarão entre 1°C e 5,8°C no Centro-Oeste, com um período de estiagem mais seco e quente até 2070. Esse período deverá predominar na região com uma duração de 7 meses; logo, as plantas deverão suportar temperaturas excessivas, acima de 32 °C nos períodos mais quentes do dia, cessando processos de fotossíntese e alterando suas fases normais de crescimento.

Região Sudeste:

- nas metrópoles, como Rio de Janeiro e São Paulo, verifica-se aumento de eventos extremos associados a enchentes e inundações. Os impactos de chuvas fortes nas capitais do Sudeste, seguidas ou não por inundações, ocasionam morbidade e mortalidade da população;
- o desmatamento das matas pluviais para plantio do café aumentou a variabilidade da precipitação, intensificando a ocorrência de escassez e ou sua abundância. A média dos modelos climáticos estudados indica maior probabilidade de redução de chuva nessas regiões, como consequência do aquecimento global;
- a projeção para a bacia do Paraná-Prata para o século XXI é de um aumento de 4 a 4,5 °C na temperatura média do ar, com eventos extremos mais frequentes. Para o final do século, é projetado um aumento de temperatura entre 2,5 e 3 °C e de chuvas de 25% a 30%;
- o meio agrícola deverá se adaptar pela substituição de espécies para outras mais adaptadas aos novos padrões de temperatura, conjugada com técnicas alternativas de plantio, como o plantio direto e o consórcio entre floresta, gado e agricultura;
- outro aspecto importante é a adaptação à escassez ou excesso hídrico, pois isso influenciará não só a intensificação da insegurança alimentar, como também o acesso à água e à saúde da população, resultando na perda da qualidade de vida na região.

Região Sul:

- os impactos negativos sobre a saúde na Região Sul do Brasil poderão surgir com o favorecimento a doenças infecciosas endêmicas sensíveis às variações do clima. Desastres como deslizamentos de terra, morte por afogamento e desabamentos poderão ser mais frequentes;
- aumentos de precipitação e vazão de rios, apesar das incertezas, poderão se intensificar;
- as temperaturas seguiram o padrão de aumento nos valores médios, com redução dos episódios de geadas e dias frios. Somando-se à condição meteorológica já afetada pelo ENOS, acentuam-se as características de adversidade do clima, determinando assim, recordes ou perdas generalizadas de produção agrícola;
- mesmo com alternativas como o plantio direto, que podem minorar os riscos climáticos, a região Sul poderá ter uma nova conformação geográfica da agricultura e pecuária, destacando uma possível aptidão de culturas até agora restringidas pelo frio em detrimento de outras, tais como frutíferas adaptadas ao

clima temperado. A soja e o milho poderão ser substituídos por culturas semiperenes, como a cana-de-açúcar.

3.6 Modelos climáticos globais e regionais

Os Modelos de Circulação Global (GCM, da sigla em inglês) têm sido desenvolvidos para simular o clima atual e usados para estimar futuras mudanças. Esses modelos são considerados pela maioria da comunidade científica como a melhor ferramenta para prever a evolução futura do sistema climático em resposta a forçantes antropogênicas, tais como o aumento na concentração de gases de efeito estufa (SOLMAN, 2013).

A maioria dos GCMs é capaz de fornecer uma representação razoável de uma caracterização climática regional. Fornece também uma descrição realista de padrões chamados de teleconexões, como a propagação de ondas na atmosfera e no oceano. Esses fenômenos, no entanto, tendem a ter escalas espaciais claramente grandes, mas quando levados à escala local, os GCMs não são mais apropriados (DIBIKE; COULIBALY, 2005).

Os modelos climáticos utilizam diferentes cenários de concentração e emissão de gases de efeito estufa para o futuro. Nos primeiros relatórios do IPCC, esses cenários eram conhecidos como *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES), mas no quinto relatório foi incorporado um novo conjunto de cenários que abrange uma gama de cenários de forçamento radiativo chamados de caminhos de concentração representativos (RCPs). Segundo Cubasch et al. (2013), são novos cenários que especificam concentrações e emissões correspondentes, mas não são diretamente baseados em cenários socioeconômicos como os cenários SRES.

Os RCPs são nomeados de acordo com o nível alvo de forçamento radiativo para 2100, são quatro cenários. O RCP 2.6 inclui um nível de forçamento muito baixo, os RCP 4.5 e RCP6 são dois cenários de estabilização média e o RCP 8.5 é um cenário de emissão de linha de base muito elevado (VUUREN et al., 2011). Na Figura 2 visualiza-se o cenário de concentração dos principais gases do efeito estufa, que são dióxido de carbono - CO₂, metano - CH₄ e óxido nitroso N₂O. Na Figura 3 visualizam-se os cenários de uso de energia primária, petróleo e os diferentes tipos de uso de energia para os diferentes RCPs.

Durante as últimas décadas, os modelos globais têm sido continuamente melhorados. Na Tabela 4 encontram-se os principais modelos climáticos globais utilizados.

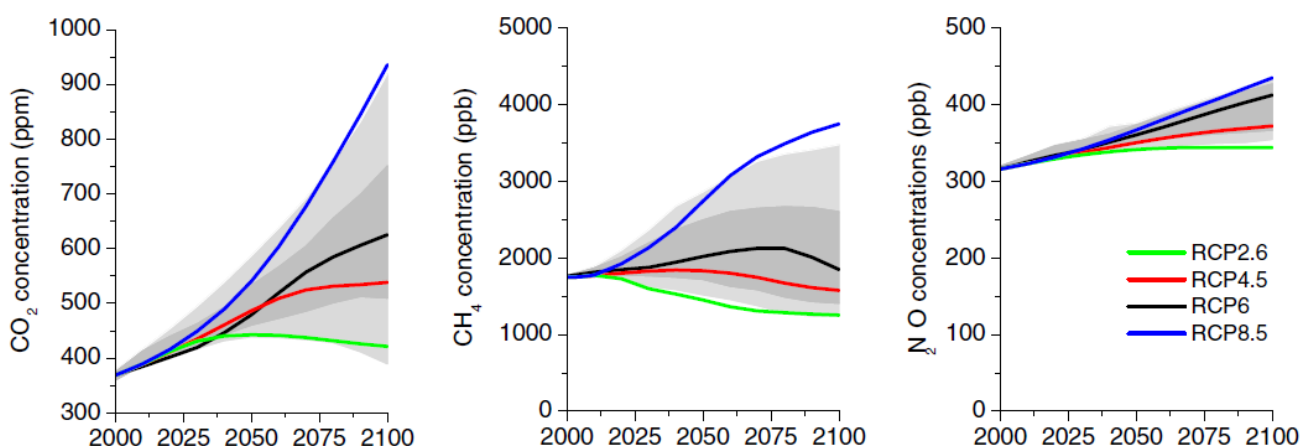


Figura 2 Concentração dos principais gases do efeito estufa.

Fonte: Vuuren et al. (2011).

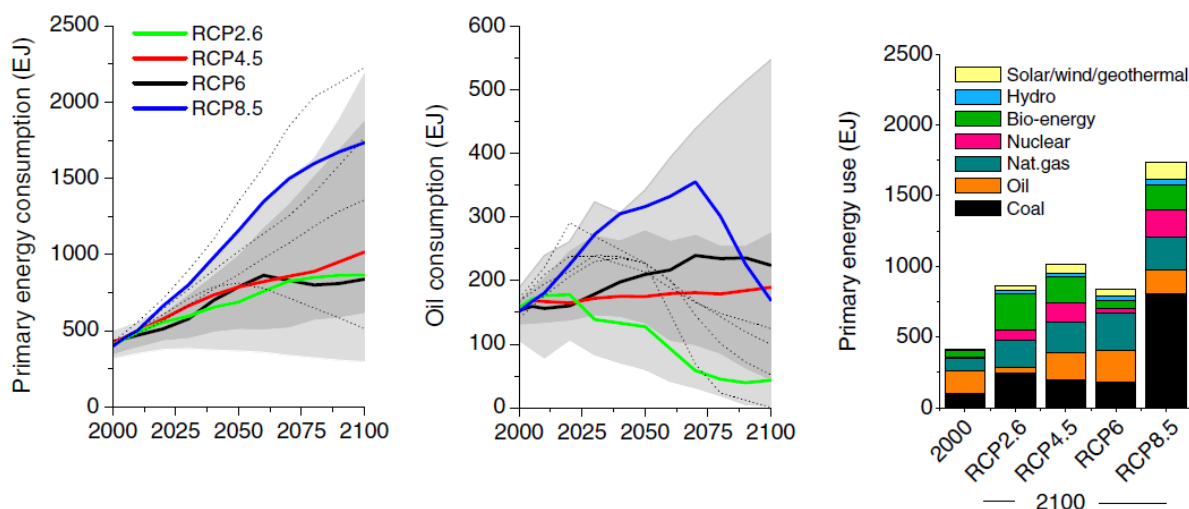


Figura 3 Consumo de energia primária, de petróleo e os diferentes usos de energias.

Fonte: Vuuren et al. (2011).

Segundo Chou, Nunes e Cavalcanti (2000), os modelos climáticos globais possuem duas limitações para simular variáveis climatológicas em pequenas escalas. A primeira delas é a limitação de resolução, que é em parte dependente da capacidade computacional em simular variáveis meteorológicas, e a segunda limitação é que muitas vezes o modelo não detecta algumas pequenas características sinóticas, pois acaba se baseando nas características de grande escala, induzindo, assim, alguns distúrbios. Em função disso, para a previsão do clima, os modelos regionais se tornam mais atrativos.

Tabela 4 Lista dos principais modelos climáticos globais utilizados

Modelo climático	Centro de Pesquisa	País
BCCR-BCM2.0	Bjerknes Centre for Climate Research	Noruega
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model	Reino Unido
CNRM-CM3	Météo-France	França
CSIRO-Mk3.0	CSIRO Atmospheric Research	Austrália
ECHO-G	Meteorological Institute of the University of Bonn	Alemanha/Coréia
CMIP5	Regional and Global Climate Modeling	EUA
GISS-ER	Goddard Institute for Space Shuttles	EUA
UKMO-HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	Reino Unido
INM-CM3.0	Institute for Numerical Mathematics	Rússia
MIROC5.	National Institute for Environmental Studies	Japão
ECHAM5	Max Planck Institute for Meteorology	Alemanha
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute	Japão
CCSM3	National Center for Atmospheric Research	EUA

Marengo et al. (2009) afirmam que os modelos climáticos regionais (RCMs) aninhados com modelos climáticos globais (GCMs) são as principais ferramentas da atualidade para estudos climáticos futuros, pois os modelos regionais foram aperfeiçoados em relação ao aumento da resolução, permitindo a simulação de processos de mesoescala. Além de melhorias dos diferentes componentes do sistema climático: a representação da topografia, o uso do solo e a distribuição terra-mar.

Os RCMs têm sido usados em todo o mundo, pois é em escala regional que as informações são mais verídicas, quando se trata de prováveis mudanças climáticas e a escala regional facilita o desenvolvimento ou a implantação de estratégias de adaptação das mudanças climáticas. Mas, atualmente, as projeções regionais são o elo mais fraco desse processo, pois as informações disponíveis para os gestores de políticas e de recursos provêm de modelos climáticos globais (MARENGO et al., 2009).

O Centro Brasileiro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tem usado o modelo regional Eta, desde 1996, para fornecer previsões de tempo sobre a América do Sul, pois o modelo é capaz de produzir resultados satisfatórios em regiões que contém orografia acentuada, como a Cordilheira dos Andes (CHOU et al., 2011).

O modelo Eta é um modelo atmosférico usado para fins operacionais e de investigação, foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado, em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e se tornou operacional no *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

Chou (1996) fez uma descrição sucinta de algumas das características principais do modelo em relação a estrutura e integração:

- Estrutura:

- a) resolução horizontal de 40 km e 80 km com 38 camadas. As equações do modelo são discretizadas para a grade E de Arakawa. A distância entre dois pontos adjacentes de massa ou de vento define a resolução da grade. Na Figura 4 visualiza-se a distribuição dos pontos na grade E. A distância d fornece a resolução do modelo;

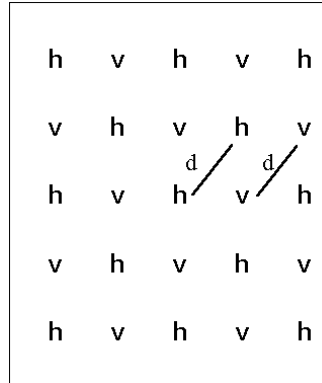


Figura 4 Distribuição dos pontos de massa h e velocidade v na grade E.

- b) coordenada vertical: uma das características principais desse modelo é a coordenada vertical definida por Mesinger (1984) citado por CHOU (1996):

$$\eta = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \cdot \left[\frac{p_r(z_s) - p_t}{p_r(0) - p_t} \right] \quad (1)$$

em que: p é a pressão atmosférica; p_t é a pressão no topo do modelo; $p_r(0)$ é a pressão ao nível médio do mar 1013 hPa; z_s é a altura da topografia; $p_r(z_s)$ é a pressão atmosférica para o nível z_s ;

- c) orografia: a orografia do modelo é representada em forma de degraus cujo topo coincide com a interface das camadas. A altura de cada degrau é obtida a partir do método de silhueta. Esse método procura o valor médio das alturas máximas da topografia dentro de cada quadrado de grade. Cada degrau possui um ponto de massa no centro e quatro pontos de velocidade localizados nos vértices;

- Integração:

- a) condições iniciais e de contorno: a estimativa inicial do modelo é obtida a partir da previsão de 12 h de algum modelo global. Os erros entre as observações e as estimativas iniciais são minimizados através do método de interpolação

ótima (OI). A análise é realizada sobre uma grade de resolução correspondente à resolução do modelo global e, posteriormente, é interpolada para a grade do modelo Eta. Para os contornos laterais, o modelo é atualizado a cada 6 horas com as previsões do modelo global;

- b) dinâmica: as variáveis prognósticas do modelo são: temperatura do ar, componentes zonal e meridional do vento, umidade específica, pressão à superfície e energia cinética turbulenta. A integração no tempo utiliza a técnica de *split-explicit* (GADD, 1978).
- c) física: o pacote físico do modelo utiliza a metodologia Betts-Miller-Janjic e Kain-Fritsch para esquemas de convecção. Para esquema de parametrização de radiação de ondas longas utiliza a metodologia Fels e Schwarzkopf (1975) e para ondas curtas Lacis e Hansen (1974). Para calcular a energia cinética turbulenta e os fluxos verticais utiliza a metodologia de Mellor - Yamada 2.5, exceto para a primeira camada para a qual é utilizada a metodologia Mellor - Yamada 2.0 e para esquema de superfície do terreno é utilizado o esquema de Noah.

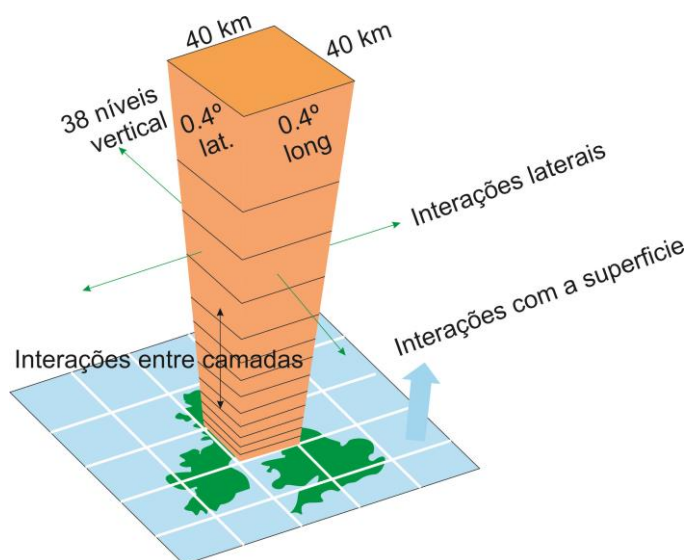


Figura 5 Grade regular vertical e horizontal do modelo Eta.

O domínio do modelo utilizado no CPTEC abrange a maior parte da América do Sul e inclui parte dos oceanos adjacentes (Figura 6). A resolução horizontal utilizada é de 40 quilômetros.

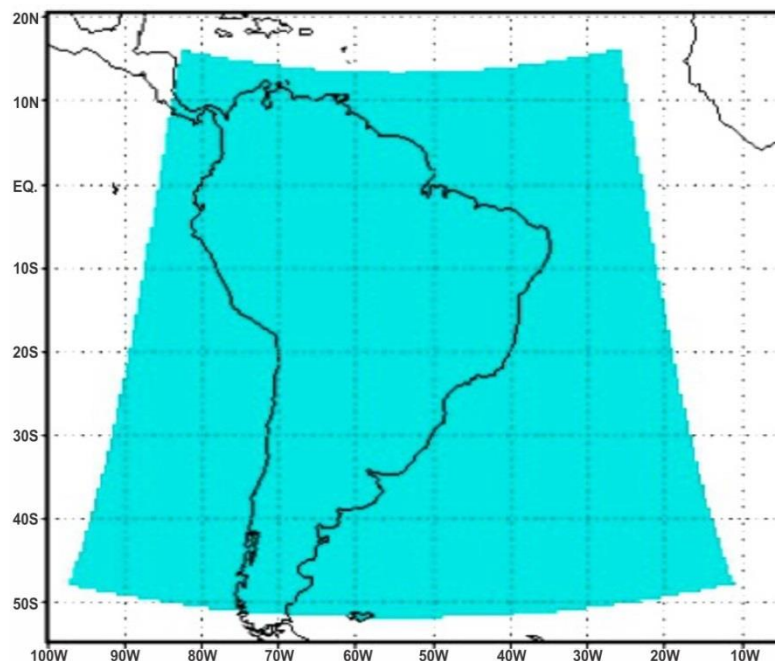


Figura 6 Domínio do modelo Eta.

Fonte: Cataldi, Machado e Guilhon (2007).

Mesinger et al. (2012) fizeram uma atualização do modelo Eta tanto na parte de estrutura quanto da parte de integração. A mais importante atualização foi referente à topografia, mas também aperfeiçoaram o esquema de convecção, cálculos dos coeficientes de taxa, conservação na difusão vertical e cálculo de diagnóstico de ventos. Também incluíram duas variáveis na parte dinâmica do modelo, vapor e hidrometeoros. Essa atualização permite produzir previsões sazonais operacionais no CPTEC (BUSTAMANTE; CHOU; SUEIRO, 2012). Esses mesmos autores concluíram que a nova versão do modelo Eta, captura bem o padrão de precipitação sobre a região Sul do Brasil nos meses de inverno.

Lima et al. (2012) analisaram projeções climáticas (2010–2040; 2040–2070; 2071–2100) para as bacias hidrográficas dos Rios Capibaribe e Brígida em Pernambuco, utilizando o modelo Eta disponibilizado pelo CPTEC/INPE, com base de dados de 1960 a 1990. Realizaram uma correção da precipitação proposto por Bárdossy e Pergram (2011) e concluíram que, com as correções realizadas, o modelo Eta representou bem a climatologia de chuvas nessas localidades e simulou de forma coerente o clima atual. Mas observaram que a projeção quanto mais afastada for do período base, maior será a redução dos totais de chuva.

Outro estudo similar a esse, utilizando o modelo Eta, foi feito por Gomes, Rozante e Bustamante (2012), para o estado de São Paulo, utilizando 53 pontos de observação diária

de precipitação do período de 1960-1990, para projeções futuras dos anos de 2010–2040, 2041-2070 e 2071–2100. Nessa pesquisa, concluíram que para a projeção futura, de cada membro em relação ao seu membro no presente, indicou a tendência de redução do número de eventos de chuvas fracas e um aumento significativo dos eventos de chuvas fortes e intensas.

Marengo et al. (2012) avaliaram cenários futuros de mudanças climáticas para a América do Sul e para três grandes bacias hidrográficas do Brasil: Amazônia, São Francisco e Paraná, utilizando o modelo Eta/HadCM3 do CPTEC/INPE. Utilizaram o período base de 1961-1990 para simular possíveis mudanças climática para 2011-2100. Sobre a Amazônia e Nordeste do Brasil, as reduções de precipitação são estimados em cerca de 30%. Já para o sudeste da América do Sul, há um aumento de chuvas em cerca de 30-50%. Essas mudanças são perceptíveis durante todo o período de 2010-2100, mas são mais intensos depois de 2040.

REFERÊNCIAS

ADAM, K. N. **Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia do rio Ibicuí.** 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2011.

ALBUQUERQUE, T. M. A. **Estudo dos processos de gestão de seca:** aplicação no estado do Rio Grande do Sul. 2010. 425 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2010.

ALTAMIRANO, R. J. A. **Climatologia dos eventos chuvosos e secos severos, extremos e muito extremos usando o índice de precipitação normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.** 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos – SP, 2010.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Journal Water Resources Research**, v. 47, p. 1-18, 2011.

BATISTA JUNIOR, W.; **Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do rio Guandu – Espírito Santo.** 2012. 146 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

BLAIN, G. C. **Avaliação e adaptação do índice de severidade de seca de Palmer (PDSI) e do índice padronizado de precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo.** 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas – SP, 2005.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Quantificação da seca agrícola pelo índice padronizado de evapotranspiração real (IPER) no estado de São Paulo. **Revista Bragantia**, Campinas – SP. v. 65, n. 3, p. 517-525, 2006.

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**, São José dos Campos – SP, v. 26, n. 1, p. 287-294, 2011.

BOGARDI, J.; WARNER, K. Here comes de flood. **Journal Nature Reports Climate Change**, London, v. 3, p. 9-11, 2009.

BRUNINI, O.; BLAIN, G. C.; BRUNINI, A. P. C.; SANTOS, R. L.; BRIGANTE, R. S.; ALMEIDA, E. L. Avaliação do índice de severidade de seca de Palmer para quantificação da seca agrícola no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu – PR: Associação Brasileira de Meteorologia, 2002, p. 1140-1147.

BUSTAMANTE, J. F.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G. Climatologia das previsões sazonais do modelo Eta sobre a América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA,

17, 2012, Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: Associação Brasileira de Meteorologia. 2012.

CATALDI, M.; MACHADO, C. O.; GUILHON, L. G. F. Análise das previsões de precipitação obtidas com a utilização do modelo Eta como insumo para modelos de previsão semanal de vazão natural. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre – RS, v. 12, n. 3, p. 5-12, 2007.

CHANG, M.; DEREZYSKI, C.; ALVE, L. H.; MACHADO, B. J.; SILVA, W. L. Índice de cenário climático: uma abordagem metodológica para estudos de vulnerabilidade climática no Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, 2012, Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: Associação Brasileira de Meteorologia. 2012.

CHOU, S. C. Modelo regional Eta. *In*: **Climanálise especial**. Edição comemorativa de 10 anos. 1 ed. Cachoeira Paulista - SP, 1996. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html>>. Acesso em: 24 ago. 2014.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Journal Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2011.

CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A. Extended range forecasts over SOUTH America using the regional eta model. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 10147 10160, 2000.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, M.C.; FACCHINI, D.; FRAME, N.; MAHOWALD, WINTHER, J. G. Introduction. *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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013. p. 119–158,

DIBIKE, Y. B.; COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 307, p. 145-163, 2005.

ESPÍNDOLA, M. A.; NODARI, E. S. As estiagens no oeste catarinense sob a perspectiva da história ambiental. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE HISTÓRIA AMBIENTAL E MIGRAÇÕES, 2, 2012, Florianópolis – SC. **Anais...** Florianópolis – SC: Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation. A new method for radiative transfer calculations. **Journal Atmospheric Sciences**, v.32, p. 1475 1488, 1975.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIN, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.
(Documento técnico).

FLEIG, A. K.; TALLAKSEN, L. M.; HISDAL, H.; DEMUTH, S. A Global evaluation of stream flow drought characteristics. **Hydrology and Earth System Sciences**. Germany, v. 10, p. 535-552, 2006.

GADD, A. J. A split explicit integration schema for numerical weather prediction. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 104, p. 569 582, 1978.

GOMES, J. L.; ROZANTE, J. R.; BUSTAMANTE, J. F. Avaliação da precipitação prevista pelo modelo Eta no período de 1960-1990 e projeções futuras. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, 2012, Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: Associação Brasileira de Meteorologia. 2012.

GUTIÉRREZ, A. P. A.; ENGLE, N. L.; NYS, E. D.; MOLEJON, C.; MARTINS, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climates Extremes**. Liverpool - UK, v. 3, p. 95-106, 2014.

HAYES, M. J.; ALVORD, C.; LOWREY, J. Drought indices. *In*: **Intermountain West Climate Summary**, The Western Water Assessment, Colorado – USA, v. 3, n. 6, p. 1-6, 2007.

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **American Meteorological Society**. Washington DC - USA, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011.

HEIM JR, R. R. A Review of twentieth-century drought indices used in United States. **American Meteorological Society**. Washington DC - USA, v. 83, n. 8, p. 1149-1166, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2013**: the physical science basis. Working group I. Disponível em: <<http://www.climatechange2013.org/>>. Acesso em: 1 set. 2014.

INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE – IWMI. **Strategy 2014 – 2018**: solution for a water secure world. Disponível em: <http://www.iwmi.cgiar.org/About_IWMI/PDF/iwmi-strategy-2014-2018.pdf>. Acesso em: 2 set. 2014.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere. **Journal Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118 133, 1974.

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

LIMA, E. A.; NETO, A. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CIRILO, J. A. Análise das projeções climáticas do modelo Eta para as bacias hidrográficas dos rios Capibaribe e Brígida – PE. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, 2012, Gramado – RS. **Anais...** Gramado – RS: Associação Brasileira de Meteorologia. 2012.

MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no século XX e cenários no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados do modelo de clima do IPCC**. Relatório nº 1. São Paulo, 2007.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.;

BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate changes scenarios in South America Using the Eta CPETEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and Paraná River Basins. **Journal Climate Dynamics**, v.38, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**. v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGON, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP** - Dossiê crise hídrica, São Paulo, n. 106, p. 31-44, 2015.

MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. an upgraded version of the Eta model. **Journal Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 116, n. 3-4, p. 63-79, 2012.

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no estado do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa – MG. v. 58, n. 5, p. 593-602, 2011.

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H.; BORROZINO, E. tendências na variabilidade climática sazonal e anual das temperaturas máxima e mínima do ar no estado do Paraná. **Revista Bragantia**, Campinas – SP. v. 70, n. 2, p. 471-479, 2011.

MISHRA, A. K; SINGH, V. P. A Review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 391, p. 202-216, 2010.

NERY, J. T.; CARFAN, A. C. Análise da chuva no estado do Paraná. CONGRESO ARGENTINO DE METEOROLOGÍA, 11, 2012, Mendoza - Argentina. **Anais...** Mendoza – Argentina: Centro Argentino de Meteorólogos. 2012.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - PBMC. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação**. Contribuição do grupo de trabalho 2 ao primeiro relatório de avaliação nacional do painel brasileiro de mudanças climáticas. Sumário executivo do GT2. Rio de Janeiro, Brasil, 2013. 28 p.

PAMPUCH, L. A.; FERRAZ, S. E. T. Investigação do modo sul em dados de precipitação no período de 1982 a 2006 no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos – SP, v. 27, n. 1, p. 107-116, 2012.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendências das séries temporais de precipitação da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos – SP, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

QUIRING, S. M. Developing objective operational. Definitions for monitoring drought. **American Meteorological Society**. Washington DC - USA, v. 48, p. 1217-1229, 2009.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regime de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos – SP, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

SANTOS, C. A. C. Recent changes in temperature and precipitation extremes in an ecological reserve in Federal District, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos – SP, v. 29, n. 1, p. 13-20, 2014.

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCLNESS, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X. **Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, 2012.** Disponível em: <http://ipcc.ch/pdf/presentations/SREX_geneva_march2012/ipcc_srex_seneviratne_geneva_201203.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.

SEVERO, D. L.; GAN, M. A. Anomalias de precipitação na região Sul do Brasil. Resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza - CE. **Anais...** Fortaleza - CE: SBM, 2004.

SILVA, F. D. S.; FERREIRA, D. B.; SARMANHO, G. F.; SANTOS, L. S. F. C.; FORTES, L. T. G.; PARENTE, E. G. P. Tendência de alterações climáticas da precipitação observadas no Brasil de 1961 a 2008 utilizando dados gradeados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém – PA. **Anais...** Belém: SBM, 2010.

SMITH, K. **Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster.** 6. Ed. New York: Routledge, 2013.

SOLMAN, S. A. Regional climate modeling over South America: a review. **Journal Advances in Meteorology**, v. 2013, p. 1-13, 2013.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; BACELAR, L. C. S.; SILVA, G. M.; COUTO, R. S. Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté. v. 8, n. 3, p. 203-213, 2013.

UNITED NATIONS. Intergovernmental negotiating committee for the elaboration of an international convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. **A/AC.241/27.** Paris, 1994.

UNITED NATIONS. International Strategy for Disaster Reduction - ISDR. **Risk and poverty in a changing climate: invest today for a safer tomorrow.** United Nations, Geneva, Switzerland, 2009.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION - UNCCD. **Land-based adaptation and resilience: powered by nature.** Disponível em: <<http://www.unccd.int/en/resources/publication/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 9 ago. 2014.

VUUREN, D. P. V.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, p. 5-31, 2011.

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

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO; GLOBAL WATER PARTNERSHIP - GWP. **Integrated Drought Management Programme**: Concept Note, 2011. Disponível em: < <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/drought/idmp/>>. Acesso em: 9 ago. 2014.

ARTIGO 1: TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO PARANÁ: CLIMA PRESENTE E FUTURO

1 INTRODUÇÃO

Entre os muitos efeitos pelos quais a variabilidade climática é responsável, uma grande preocupação é a iminência de um possível aumento na ocorrência de eventos extremos em todo o mundo, o que poderia afetar diretamente a população humana e outros organismos vivos. Diversos estudos e investigações têm sido conduzidos a fim de identificar quais os elementos que estão causando tais impactos e quais são suas intensidades e frequências de ocorrências (ZANDONADI et al., 2016).

De acordo com PBMC (2013), algumas regiões do Brasil podem experimentar mudanças na temperatura e chuvas como consequências do aquecimento global. Poderão ocorrer intensificações de eventos severos, causando graves impactos em cidades e áreas vulneráveis às mudanças climáticas. Os possíveis impactos dessas mudanças ocorrerão em diferentes escalas, de acordo com as características específicas de cada região do Brasil. Por isso, é necessário conhecer e mapear as vulnerabilidades das regiões brasileiras para identificar, propor e implementar medidas de adaptação.

Entre todas as variáveis, a precipitação é uma das mais importantes variáveis meteorológicas que podem determinar a ocorrência de seca ou inundação. A análise dos dados de precipitação fornece informações relevantes que podem ser usadas para melhorar as estratégias de manejo da água, proteger o meio ambiente, planejar a produção agrícola, ou seja, essas informações impactam no desenvolvimento econômico de uma determinada região (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013).

Nos últimos anos, vários cientistas de todo o mundo compararam e analisaram as tendências de precipitação, mas o foco não foi somente na precipitação, mas também em outros parâmetros meteorológicos que foram estudados para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação de futuras mudanças potenciais. Os Modelos Climáticos Globais (GCMs) e o *downscaling* dinâmico, usando Modelos Climáticos Regionais (RCMs), são as principais ferramentas para as análises destinadas a avaliar o

clima que provavelmente ocorrerá em futuro próximo e não tão próximo (MARENGO et al., 2012).

Singh e Goyal (2016) analisaram a variabilidade espacial e temporal dos índices extremos de precipitação e de precipitação *lapse rate* da bacia hidrográfica do rio Teesta, em Sikkim, no norte do Himalaia oriental. Para isso, utilizaram-se durações de séries observadas (1980-2005) e conjuntos de dados de precipitação projetados (2006-2100) simulados pelo modelo CMIP5 ESM-2M (em sua 5ª fase), empregando três diferentes cenários de forçamento radiativo (RCP).

Na Coreia, Kim et al. (2016) pesquisaram ondas de calor associadas a mudanças climáticas, usando uma série de dados observacionais de 1994-2012, para deduzir os fatores causais que afetam o número de mortes por distúrbios de calor. Para simular futuras mudanças na incidência de ondas de calor na Coreia para o período 2013-2060, eles usaram os dados simulados usando o *Hadley Center Global Environmental* para dois cenários RCP: RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados são preocupantes, visto que é esperada uma elevação da taxa de morte em cinco vezes para o RCP 4.5 e 7.2 vezes para o RCP 8.5., portanto, de algum modo, esse aumento da taxa de mortes deve ser interrompido.

No Sudeste do Brasil, foi realizado um estudo sobre possíveis mudanças na temperatura do ar e seu efeito sobre a qualidade da bebida de café. Com base nas projeções climáticas utilizando o Eta/HadCM3 para o período de 2011-2100, foram simuladas possíveis mudanças futuras e os efeitos deste processo sobre a qualidade da bebida de café e os resultados indicaram que, no caso de ocorrência de cenário de emissão de A1B, a qualidade da bebida de café pode ser afetada nesta região alterando o sabor para mais forte e desagradável, consequência do aumento da temperatura do ar (GIAROLLA et al., 2012).

O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade e a tendência dos dados de precipitação observados (1980-2010) e os dados simulados por Eta/Miroc5 (2016-2050) para RCP 4.5 do estado do Paraná, no Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas as séries mensais de precipitação 1980-2010 da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) de 24 estações de precipitação no estado do Paraná. Na

Figura 1a visualiza-se a distribuição espacial das estações. As lacunas de dados foram preenchidas com os valores dos postos vizinhos mais próximos. Para aplicar esse método, foram estabelecidos dois critérios: 1) a correlação (Pearson (r)) entre as séries mensais de precipitação de ambos os observatórios ser superior a 0,7; 2) a distância euclidiana mais próxima entre altitude, longitude e latitude, com a distância mais curta de 100 km.

Para o futuro, um conjunto de dados climáticos foi simulado pelo Centro de Previsão Meteorológica e Pesquisa Climática (CPTEC/INPE), utilizando o modelo climático regional Eta. Esse modelo está aninhado no modelo de clima global MIROC5, usando o cenário futuro RCP 4.5 (IPCC, 2014), para um período de 34 anos: 2016-2050. Essa simulação gerou uma grade com 828 pixels no estado do Paraná (Figura 1b) e foram utilizados aqueles com a menor distância das estações de precipitação selecionadas para este estudo (Figura 2). Na Tabela 5, estão as coordenadas geográficas dos dados utilizados (passado e futuro) e a distância entre a estação histórica e o ponto futuro dos dados simulados.

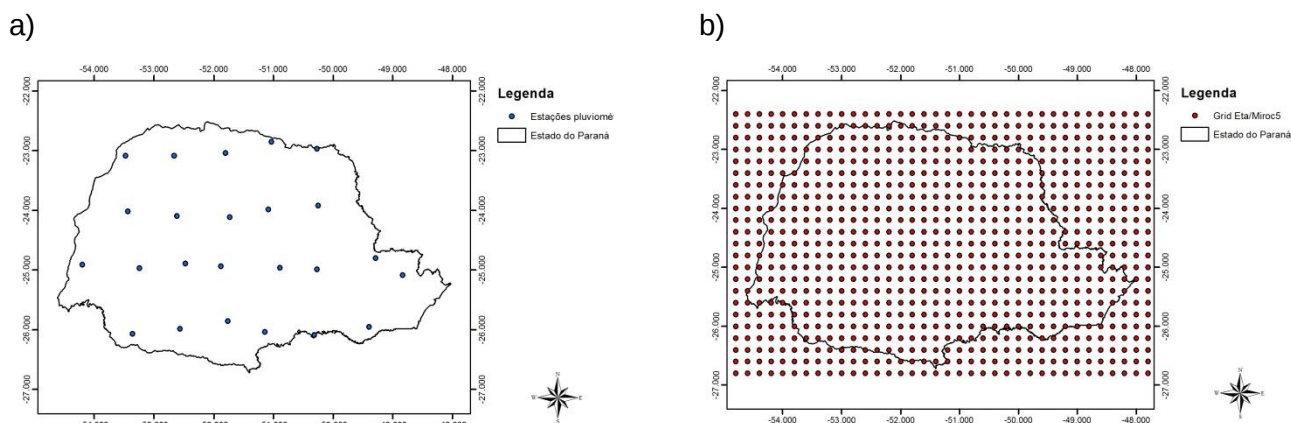


Figura 1 a) Distribuição espacial das 24 estações pluviométricas no estado do Paraná; b) Grid do modelo Eta/MIROC5 com 824 pixels cobrindo o estado do Paraná.

Tabela 1 Informações das estações pluviométricas e dos pontos dados futuros pelo cenário RCP 4.5 Eta/Miroc5

Nº	Estações	Dados históricos			Dados futuros		Distância entre elas (km)
		Latitude	Longitude	Altitude	Latitude	Longitude	
1	2454018	-24,9061	-54,2014	243	-25,0000	-54,2000	10,4
2	2653016	-26,0644	-53,3622	557	-26,0000	-53,4000	8,1
3	2453056	-24,9628	-53,2439	697	-25,0000	-53,2000	6,0
4	2453008	-24,0147	-53,4397	427	-23,9990	-53,4000	4,4
5	2353010	-23,0817	-53,4811	349	-22,9990	-53,4000	12,4
6	2552044	-25,9833	-52,5667	700	-26,0000	-52,6000	3,8
7	2452019	-24,8858	-52,4739	741	-24,8000	-52,4000	12,1
8	2452029	-24,0906	-52,6214	582	-23,9990	-52,6000	10,4
9	2352052	-23,0831	-52,6667	450	-22,9990	-52,6000	11,5
10	2551019	-25,8500	-51,7667	1245	-25,8000	-51,8000	6,5
11	2451010	-24,9333	-51,8833	900	-25,0000	-51,8000	11,2
12	2451049	-24,1144	-51,7342	618	-24,1990	-51,8000	11,5
13	2351065	-23,0403	-51,8056	485	-22,9990	-51,8000	4,6
14	2651005	-26,0306	-51,1419	840	-26,0000	-51,1990	6,6
15	2450049	-24,9575	-50,8917	743	-25,0000	-50,7990	10,5
16	2351041	-23,9831	-51,0831	1011	-23,9990	-50,9990	8,7
17	2251039	-22,8517	-51,0319	370	-22,7990	-50,9990	6,5
18	2650005	-26,0833	-50,3167	770	-26,0000	-50,3990	12,4
19	2450021	-24,9831	-50,2667	950	-25,0000	-50,1990	7,1
20	2350041	-23,9167	-50,25	600	-23,9990	-50,1990	10,5
21	2250033	-22,9653	-50,2661	423	-22,9990	-50,1990	7,8
22	2549003	-25,9500	-49,3931	810	-26,0000	-49,3990	5,8
23	2449006	-24,8000	-49,2833	270	-24,8000	-49,1990	8,5
24	2548040	-25,0833	-48,8333	670	-25,0000	-48,7990	9,9

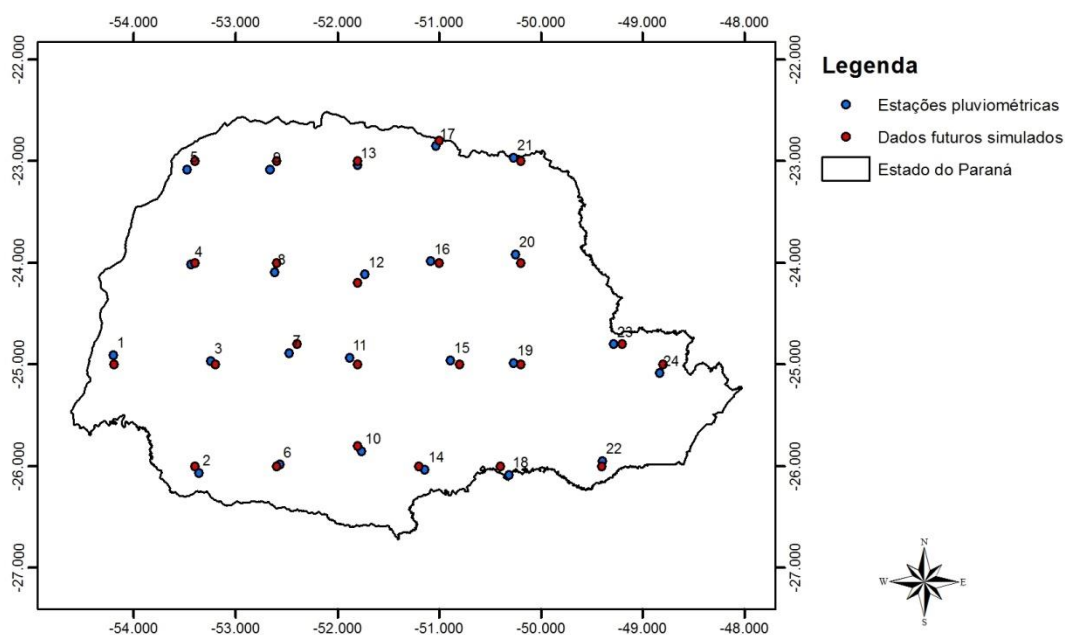


Figura 2 Distribuição espacial das 24 estações pluviométricas no estado do Paraná e os dados futuros simulados com o modelo Eta/MIROC.

Com o objetivo de detectar tendências, a estatística não-paramétrica de Mann-Kendall foi utilizada na série de precipitação. Foi incorporada a série de 1980-2010 com a série 2016-2050, considerando uma única série em cada par de pontos estudado. O teste estatístico de Mann-Kendall é:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1, & \text{se } \theta > 0 \\ 0, & \text{se } \theta = 0 \\ -1, & \text{se } \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Foi usada a transformação Z , que foi calculada utilizando:

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

onde:

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

onde: $\text{sgn}(x_j - x_i)$ é a função sinal, n é a quantidade de termos ou o comprimento da série temporal, m é o número de grupos vinculados e t_i denota o número de vínculos de extensão i. Um grupo vinculado é um conjunto de dados de amostra com o mesmo valor.

Se os valores de Z são positivos, isso mostra tendências crescentes; valores negativos de Z indicam tendências decrescentes. Para este estudo foi considerado nível de significância de 5% para o teste de Mann-Kendall.

O teste de Mann-Kendall permite detectar tendências estatisticamente significativas, mas não fornece estimativas em relação à magnitude da tendência, por isso a aplicação foi complementada pelo estimador de inclinação de Sen's. Ele é definido como:

$$B = Md \left(\frac{x_i - x_j}{t_i - t_j} \right) \quad (6)$$

onde: Md é o valor da mediana, x_i e x_j são valores de dados no tempo t_i e t_j ($i > j$), respectivamente.

O teste estatístico de Mann-Kendall e o estimador de inclinação de Sen's têm sido frequentemente usados para testar tendência ascendente ou descendente em séries hidrometeorológicas. (GOCIC; TRAJKOVIC, 2013; SANTOS; FRAGOSO, 2013; YÜREKLI, 2015).

Para determinar se existem diferenças estatisticamente significantes entre as medianas de dois grupos, aplicou-se o teste de Mann-Whitney, para isso a série de 1980-2010 foi comparada com a série 2016-2050. As estatísticas de teste de Mann-Whitney são descritas como:

$$Z = \frac{w - \frac{n(n+m+1)}{2}}{\sqrt{\frac{nm(n+m+1)}{12}}} \quad (7)$$

onde: w é a estatística de Mann-Whitney, n é o número de termos das séries históricas e m é o número de termos da série futura. A hipótese nula determina se a mediana da série histórica é igual à mediana da série futura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de Mann-Kendall, o estimador de declive de Sen's e o teste de Mann-Whitney são apresentados na Tabela 2.

A precipitação mensal em quinze pontos no estado do Paraná tende a aumentar até 2050 e dois pontos tendem a diminuir. Os pontos com tendência crescente são 6, 7, 9, 10, 12-15, 17-21, 23 e 24. Os pontos com tendência decrescente são os pontos 2 e 11 (Tabela 2).

Considerando os anos de 1980 a 2050, a tendência da precipitação mensal no ponto 2 tende a diminuir a uma razão de 0,0605 mm/mês e no ponto 11 de 0,0369 mm/mês. Os pontos que têm uma tendência crescente são: 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23 e 24, a taxa de aumento de 0,0967; 0,1307; 0,0479; 0,1273; 0,1642; 0,0515; 0,1186; 0,1641; 0,1612; 0,1372; 0,0443; 0,0319; 0,0428; 0,1896 e 0,0794 mm/mês, respectivamente.

Ainda na Tabela 2, os resultados da estatística do teste de Mann-Whitney corroboram a estatística de Mann-Kendall e dezessete dos vinte e quatro pontos mostram

tendências com nível de significância de 5%, indicando que há uma mudança na tendência de precipitação mensal no estado do Paraná. Apenas no ponto 20 os testes não ratificaram.

Cera e Ferraz (2015) analisaram tendências de precipitação no Rio Grande do Sul, para três conjuntos de dados, com uma comparação dos dados de precipitação observados (1982-2006) e os dados simulados pelo modelo RegCM3 Regional Model, para os anos de 1982-2006 e 2070-2086. Os resultados mostraram uma tendência crescente de precipitação para o estado. Eles aplicaram o teste Run e o teste de Pettit para certificar a homogeneidade dos dados para a série 1982-2006, mas os testes deram resultados diferentes, o teste Run indicou homogeneidade e o outro não. Foi utilizado o teste de Mann-Kendall para uma terceira certificação e este confirmou o teste de Pettit, indicando uma tendência aumentada de precipitação para um nível significativo de 99,9% para as regiões do extremo norte e centro do estado do Rio Grande do Sul. No mesmo estudo, também foi analisado a tendência de precipitação para o clima futuro e os resultados também indicam aumento da tendência de precipitação para as regiões oeste, sul e central do estado, num nível de significância de 90%.

Tabela 2 Testes estatísticos de tendência de precipitação para o estado do Paraná

Mann-Kendall		Sen's slope	Mann-Whitney		
p-value crescente	p-value decrecente	mm/mês		Mediana	p-valor
0.501	0.498	0.0000	Hist1	130.20	0.992
			Fut 1	121.90	
0.999	0.000*	-0.0605	Hist2	160.80	0.000*
			Fut 2	120.77	
0.083	0.917	0.0218	Hist3	153.10	0.204
			Fut 3	154.92	
0.243	0.757	0.0089	Hist4	122.65	0.584
			Fut 4	121.91	
0.153	0.846	0.0137	Hist5	115.00	0.256
			Fut 5	121.00	
0.000*	1.000	0.0967	Hist6	153.15	0.000*
			Fut 6	207.08	
0.000*	1.000	0.1307	Hist7	138.70	0.000*
			Fut 7	204.38	
0.399	0.600	0.0031	Hist8	122.30	0.963
			Fut 8	121.37	
0.000*	0.999	0.0479	Hist9	100.55	0.000*
			Fut 9	121.77	
0.000*	1.000	0.1273	Hist10	167.35	0.000*
			Fut 10	229.32	
0.995	0.004*	-0.0369	Hist11	144.70	0.001*
			Fut 11	122.00	
0.000*	1.000	0.1642	Hist12	119.75	0.000*
			Fut 12	197.46	
0.000*	0.999	0.0515	Hist13	103.10	0.000*
			Fut 13	128.94	
0.000*	1.000	0.1186	Hist14	134.15	0.000*
			Fut 14	201.88	
0.000*	1.000	0.1641	Hist15	122.10	0.000*
			Fut 15	212.52	
0.451	0.549	0.0018	Hist16	133.20	0.508
			Fut 16	121.85	
0.000*	1.000	0.1612	Hist17	93.55	0.000*
			Fut 17	183.20	
0.000*	1.000	0.1372	Hist18	112.65	0.000*
			Fut 18	193.35	
0.000*	0.999	0.0443	Hist19	110.65	0.011*
			Fut 19	121.61	
0.009*	0.991	0.0319	Hist20	112.70	0.063
			Fut 20	119.89	
0.000*	0.999	0.0428	Hist21	100.80	0.001*
			Fut 21	121.83	
0.064	0.935	0.0192	Hist22	120.50	0.514
			Fut 22	121.38	
0.000*	1.000	0.1896	Hist23	101.15	0.000*
			Fut 23	197.23	
0.000*	1.000	0.0794	Hist24	115.70	0.000*
			Fut 24	152.82	

Nota: *Tendência estatisticamente significativa, a 5% de significância.

Outra pesquisa, semelhante ao estudo acima, foi feita por Marengo et al. (2009) para a América do Sul. Foi utilizado o sistema de modelagem climática regional PRECIS para a precipitação anual, usando dados de precipitação de passado recente (1961-1990) e de futuro (2071-2100), os resultados mostraram uma tendência de aumento de precipitação extrema para o sudeste da América do Sul. Na pesquisa de Doyle, Saurral e Barros (2012)

foram considerados somente dados observados de 1960 a 2005, portanto 46 anos para a Bacia do Prata, o norte desta bacia inclui o estado do Paraná. Com níveis de confiança de 5 e 10%, todas as estações apresentam tendências crescentes de precipitação, com valores superiores a 8 mm/ano sobre o sul do Brasil. Marengo et al. (2012) fizeram uso do modelo Eta/HadCM3, configurado com um tamanho de grade de 40 km, para analisar possíveis mudanças futuras (2011-2100) na climatologia das bacias do São Francisco, Amazonas e do Rio Paraná. Foi detectado o aumento de chuvas no sudeste da América do Sul em cerca de 30-50%, especificamente no verão, sendo que as mudanças são discerníveis ao longo do período 2010-2100, mas são mais intensas após 2040. Em relação as três bacias estudadas, a chuva tende a diminuir até 2100, sendo que na bacia do Rio Paraná, que, ao Sul inclui o estado do Paraná, a tendência de variação média anual de chuva é de -0,2 mm/dia.

De acordo com o PBMC (2013), no Sul do Brasil e Norte da Argentina foram observadas tendências para aumento das chuvas e vazões de rios desde meados do século XX. O Rio Paraná - Prata apresentou uma tendência de queda desde 1901 a 1970 e um aumento sistemático nas vazões desde o início dos anos 1970 até o presente. Também se afirma que, com a mudança no clima, os desastres da região Sul, como deslizamentos de terra, morte por afogamento e desmoronamento de edifícios, podem ser mais frequentes. A agricultura e a pecuária da região também são vulneráveis às mudanças climáticas, pois há numerosos registros do fenômeno *El Niño Oscillation Southern* (ENOS), que acentuam as características de condicionamento/ adversidade do clima na produção agrícola, determinando registros de produção ou perdas generalizadas. Somam-se à condição meteorológica, já afetada pelo ENOS, registros de aumento da temperatura do ar, nos mais diversos municípios do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná que, inevitavelmente, influenciam não só a agricultura, pecuária e segurança alimentar, mas também em questões ambientais como o ciclo hidrológico e de saúde da população. Aumentos de precipitação e vazão de rios, apesar das incertezas, poderão se intensificar, conforme os cenários projetados pelo IPCC. As temperaturas seguiram o padrão de aumento nos valores médios, com redução dos episódios de geadas e dias frios.

O estudo realizado por Sun et al. (2014), sobre as variações da temperatura e precipitação global para o período de 1948 a 2010, endossa os resultados de mudança de precipitação. Para a América do Sul, segundo esses autores, as mudanças de magnitudes de precipitação são de, aproximadamente, 10%. Foram utilizados dados do Centro Nacional de Previsão Ambiental/Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas (NCEP/NCAR), num *grid* de $2,5 \times 2,5^\circ$ de resolução. Comparando a resolução utilizada por Sun et al. (2014), com o realizado neste estudo com o Eta/Miroc5, têm-se um maior refinamento já que a resolução foi de 20 km x 20 km.

A localização dos pontos e a direção das tendências das séries mensais de dados de precipitação, durante o período 1980-2050, são mostradas na Figura 3. As tendências significativas de aumento foram encontradas em quase todas as mesorregiões do estado do Paraná, exceto na mesorregião Oeste e Centro Ocidental, onde não há qualquer tendência. No Sudoeste e no Centro Sul, dois pontos foram detectados para tendência decrescente, mas também foram encontradas tendências crescentes.

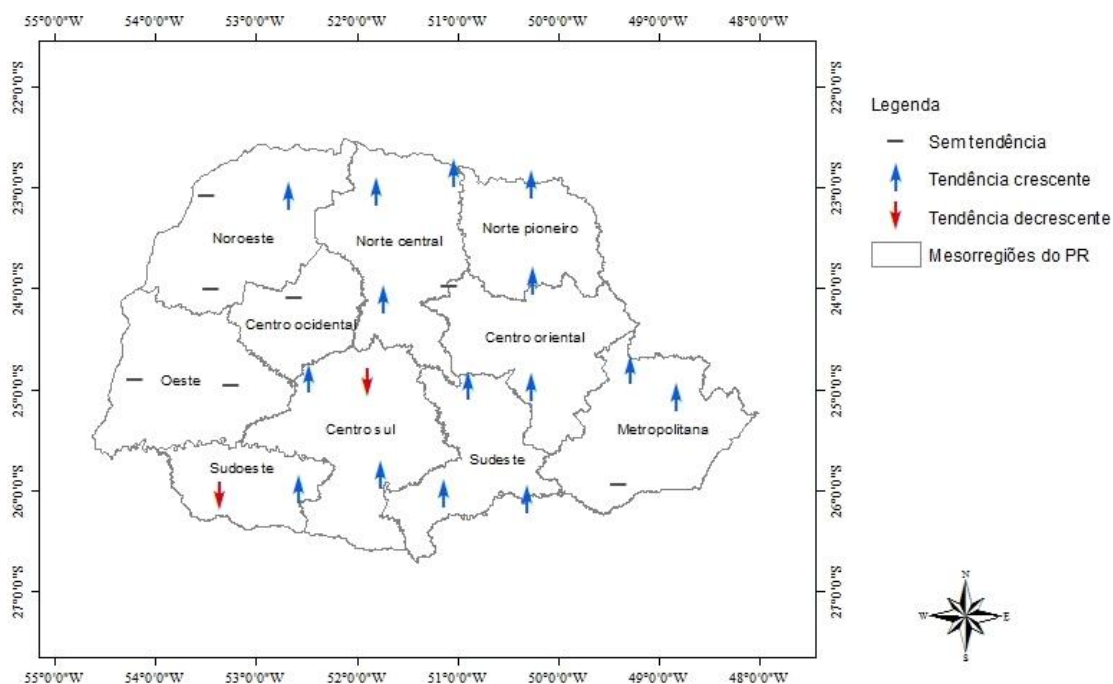
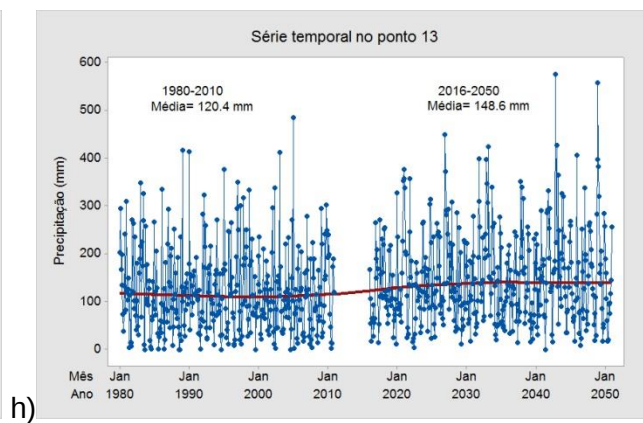
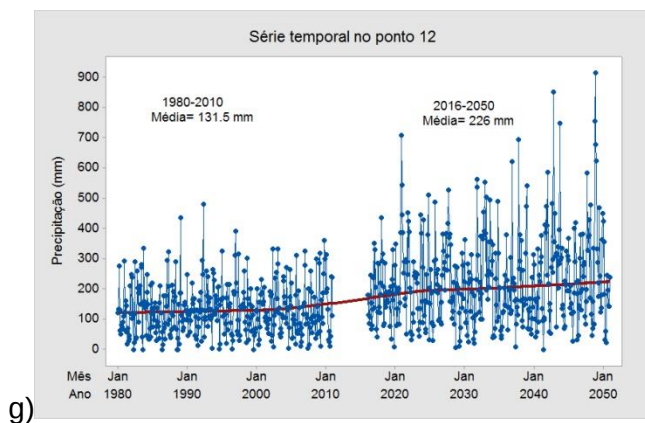
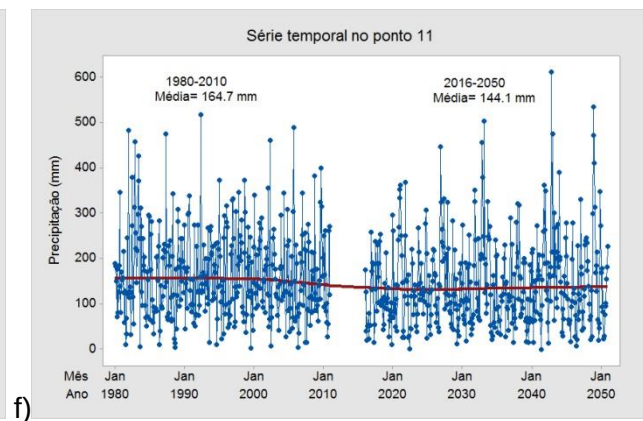
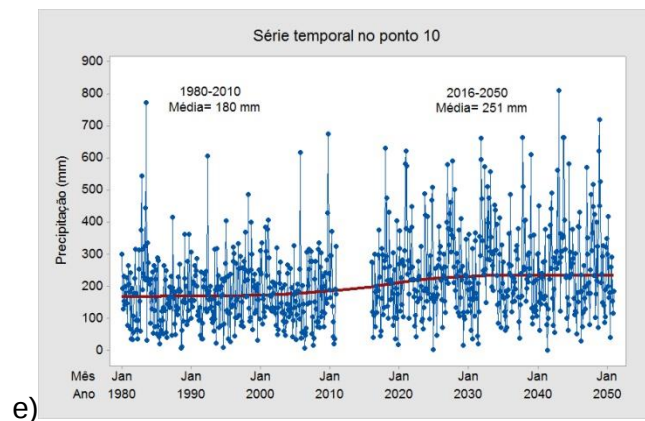
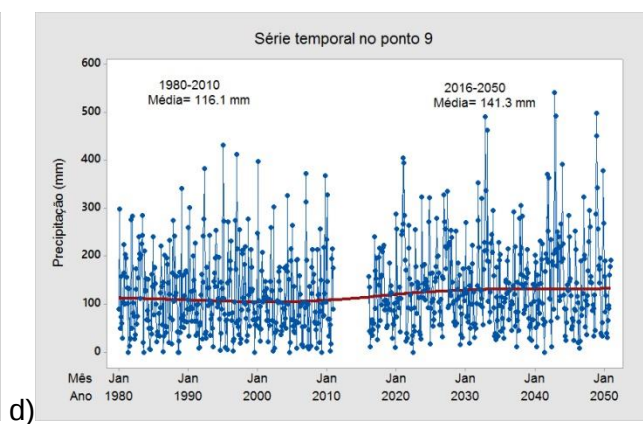
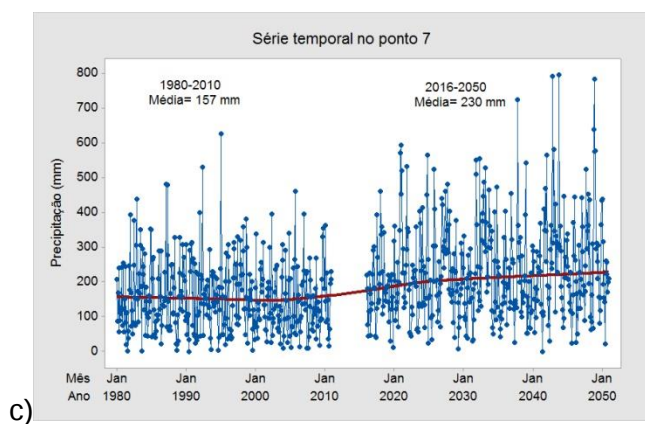
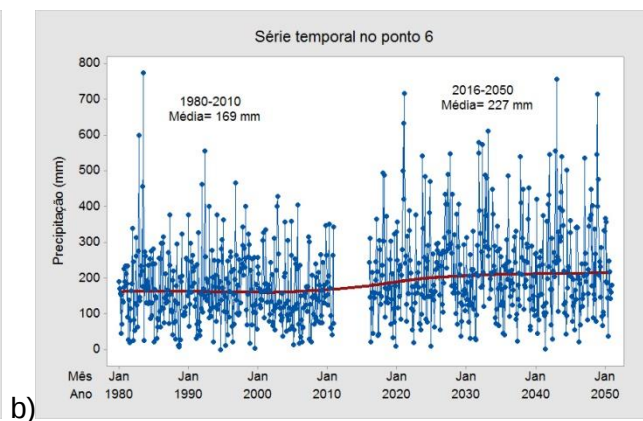
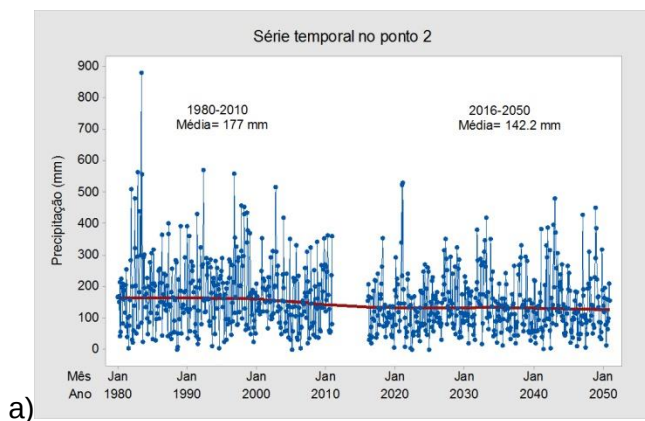


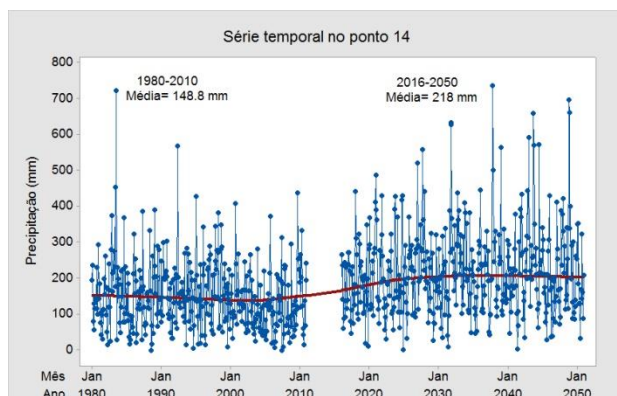
Figura 3 Distribuição espacial dos pontos estudados mostrando as tendências de aumento, diminuição ou estabilidade da precipitação, para o período de 1980-2050.

Comparando este resultado com o obtido por Zandonadi et al. (2016), cujo objetivo era abordar aspectos relacionados à variação da quantidade de precipitação no período de 1986 a 2011 na Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, para 32 estações meteorológicas, sendo 6 pertencentes ao estado do Paraná, há semelhança nos resultados, pois, ambos apresentaram tendência crescente na região de Curitiba (Mesorregião Metropolitana) e nos municípios de Castro (Centro Oriental), Irati (Sudeste), Maringá e Londrina (Norte Central), mas diferem na região de Campo Mourão (Centro Ocidental), onde este estudo não mostra tendência e o estudo de Zandonadi et al. (2016) apresentou tendência decrescente.

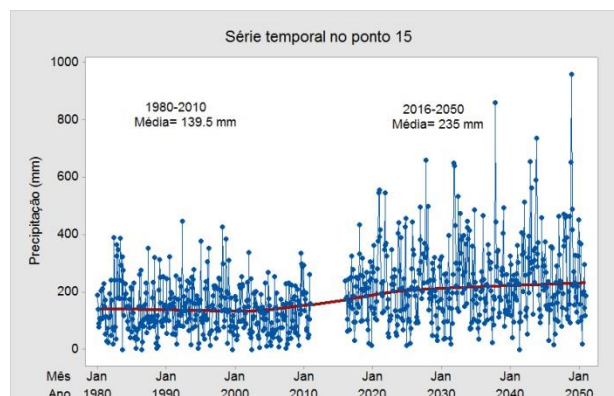
A Figura 4 mostra a variação temporal da precipitação mensal de dezessete pontos nos quais houve tendência de aumento ou redução dos valores. Observa-se nos gráficos variabilidade no acúmulo mensal de precipitação. Por exemplo, na Figura 4j, o número máximo de acumulação mensal observado atinge aproximadamente 1000 mm, enquanto no gráfico da Figura 4o verifica-se que a precipitação atinge 500 mm/mês. A linha vermelha confirma a tendência apresentada na Tabela 2 e corrobora com Grimm, Barros e Doyle (2000), que dizem que no Sul do Brasil há características sazonais de chuvas que podem

ser alteradas quando presentes os fenômenos *El Niño* / *La Niña*, causando eventos extremos de precipitação, como excesso ou déficit.

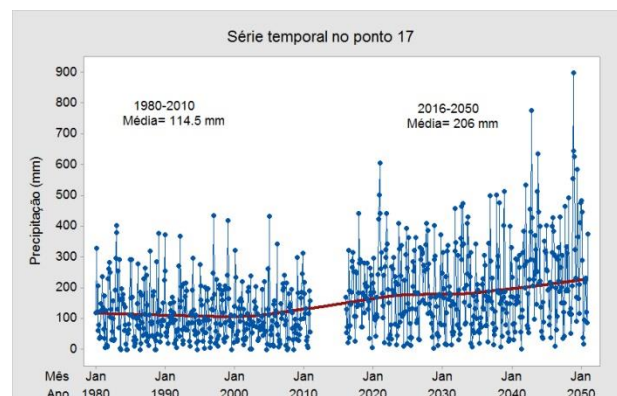




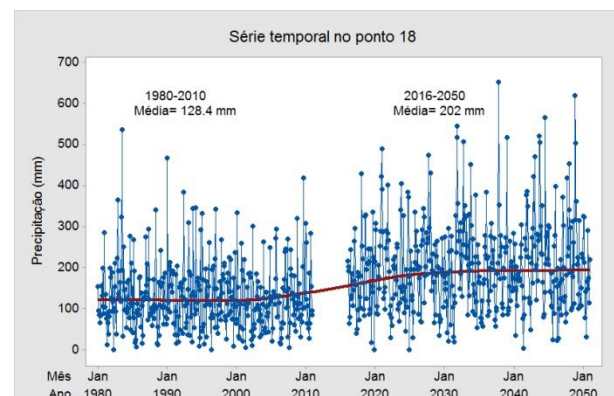
i)



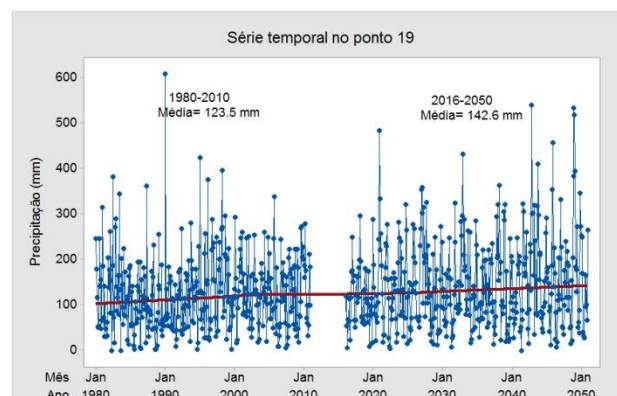
j)



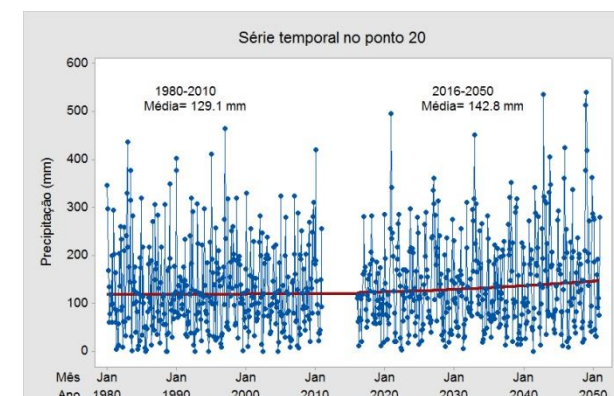
k)



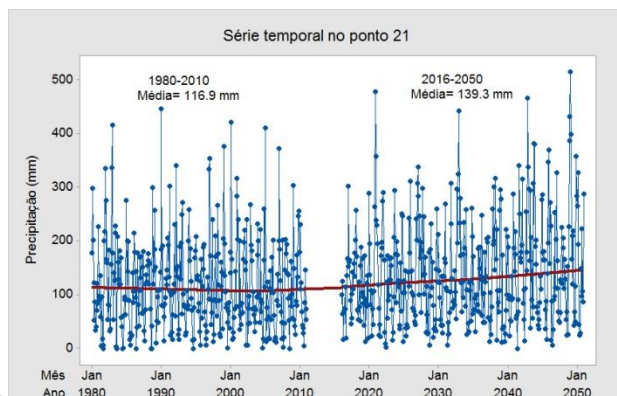
l)



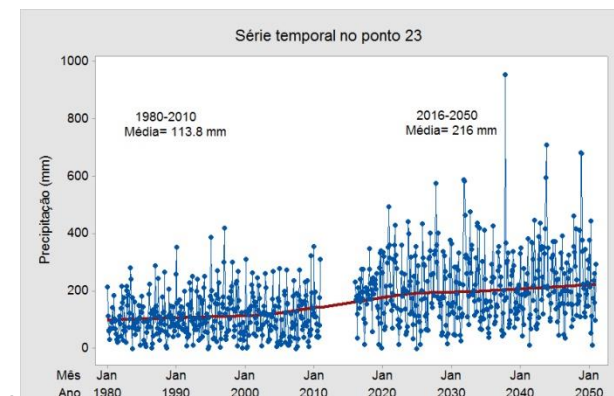
m)



n)



o)



p)

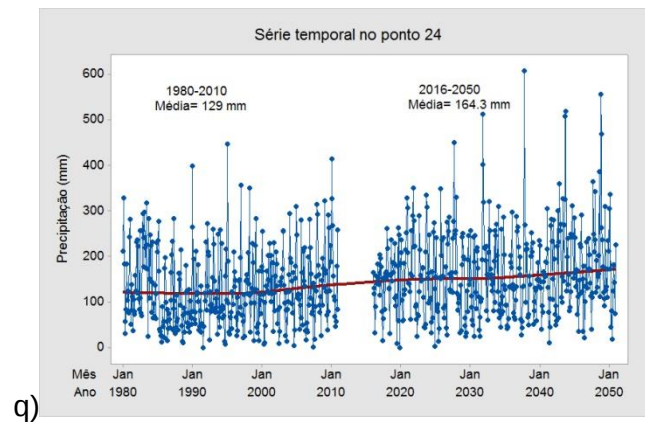


Figura 4 Variação temporal nos pontos onde mostram mudanças de tendências de precipitação durante o período 1980-2050, juntamente com a média de precipitação histórica e futura.

Ainda em relação à variabilidade, houve alta irregularidade entre cada mês. Na Figura 4b, verifica-se que a média na série histórica é de 169 mm/mês e a média na série futura é de 227 mm/mês, o que representa um aumento de 34,32%. Na série temporal da Figura 4k, as médias são 114,5 e 206 mm/mês, passado e futuro, respectivamente, representando um aumento de 79,91%. O mesmo acontece na Figura 4l, em que se verifica um aumento de precipitação de 57,32%. De acordo os dados apresentados na Tabela 2, a maior magnitude entre a média histórica e futura é a que está representada na Figura 4p, que mostra tendência de aumento de chuva em uma média de 89,81% e na Figura 4a em que a magnitude indicada é de 19,66%, mas, mostrando redução da precipitação. Assim, se estas expectativas de aumento ou diminuição se concretizarem no futuro, podem haver impactos positivos e negativos, um exemplo de um impacto positivo é o pleno na água subterrânea e um exemplo de um impacto negativo é o aumento das inundações.

CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos e os resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se concluir que:

- ambas as séries, a histórica (1980-2010) e a futura (2016-2050), simuladas pelo Eta/MIROC5, dos vinte e quatro pontos localizados no estado do Paraná, quinze apresentaram tendências mensais de aumento da precipitação e dois pontos mostraram uma diminuição na tendência mensal de precipitação;

- em alguns pontos, há diferença entre a precipitação mensal média de 1980-2010 em comparação com a precipitação esperada média de 2016-2050;
- os resultados também apresentaram variabilidade na precipitação mensal, tanto na série histórica quanto na série futura.

REFERÊNCIAS

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n.1, p. 81–88, 2015.

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

GIAROLLA, A.; RESENDE, N.; CHOU, S. C.; TAVARES, P. S.; RODRIGUES, D. C. Coffee beverage quality assessment based on Eta/CPTEC-HadCM3 model (A1B-IPCC/SRES scenario), Southeastern Brazil. **Geophysical Research Abstracts**, v.14, n.1, p. 6224, 2012.

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.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 13, p. 35–58, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2013: the physical science basis**. Working Group I. Disponível em: <<http://www.climatechange2013.org/>>. Acesso em: 1 set. 2014.

KIM, D. W.; DEO, R. C.; CHUNG, J. H.; LEE, J. S. Projection of heat wave mortality related to climate change in Korea. **Natural Hazards**, v.80, p. 623-637, 2016.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future Change of Temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**. v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate changes scenarios in South America Using the Eta CPETEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and Paraná River Basins. **Journal Climate Dynamics**, v.38, p. 1829-1848, 2012.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - PBMC. **Executive Summary: Impacts, vulnerability and adaptation to climate change**. Contribution from GT2 to the Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre de Mudanças Climáticas (RAN1) of the painel brasileiro de mudança climática (PBMC). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 28p.

SANTOS, M.; FRAGOSO, M. Precipitation variability in Northern Portugal: data homogeneity assessment and trends in extreme precipitation indices. **Atmospheric Research**, v.131, p. 34-45, 2013.

SINGH, V.; GOYAL, M. K. Analysis and trends of precipitation lapse rate and extreme indices over north Sikkim eastern Himalayas under CMIP5ESM-2M RCPs experiments. **Atmospheric Research**, v.167, p. 34-60, 2016.

SUN, Q.; KONG, D.; MIAO, C.; DUAN, Q.; YANG, T.; Ye, A.; GONG, W. Variations in global temperature and precipitation for the period of 1948 to 2010. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 9, p. 5663–5679, 2014

YÜREKLI, K. Impact of climate variability on precipitation in the Upper Euphrates – Tigris Rivers Basin of Southeast Turkey. **Atmospheric Research**, v.154, p. 25-38, 2015.

ZANDONADI, L.; ACQUAOTTA, F.; FRATIANNI, S.; ZAVATTINI, J. A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**. v.123, p. 741–756, 2016.

ARTIGO 2 CENÁRIOS DE SECA METEOROLÓGICA NO ESTADO DO PARANÁ: PASSADO E FUTURO

INTRODUÇÃO

A conjuntura de seca causa impactos não somente na condição de abastecimento público e agricultura, mas também em outras atividades, como funcionamento de escolas, empresas e hospitais. Ainda, os preços dos alimentos da energia e da água aumentam, assim como o número de incêndios florestais entre outros inconvenientes que levam muitas vezes a agitação social e protestos das populações (NOBRE et al., 2016).

Essa disponibilidade de água muitas vezes não está relacionada apenas com a escassez de chuva, além da questão climática, os especialistas apontam outros responsáveis para o problema da falta de água, como as políticas não adequadas de gestão dos recursos hídricos e a falta de educação ambiental dos cidadãos, que se traduz em alta poluição e desperdício de água (MARENGO et al., 2015).

Segundo Albuquerque (2010), no Brasil a gestão da seca sempre foi, e continuará sendo, considerada uma gestão de crises, em que as ações realizadas são respostas ao fenômeno já consolidado. O Brasil é considerado um país tropical, com temperaturas elevadas e chuvas normalmente abundantes, mas de acordo com Teixeira et al. (2013), a seca pode ocorrer em qualquer região sem diferenciação de clima, pois mesmo em um clima com características predominantemente úmidas, como no Brasil, esse fenômeno pode se manifestar.

Em 2014-2015, o sudeste do Brasil, principalmente a região metropolitana de São Paulo, vivenciou uma das maiores secas de sua história. Segundo Marengo et al. (2015), foi uma situação anunciada em função da demanda crescente e do histórico de situações hídricas semelhantes. Seneviratne et al. (2012) disseram que, provavelmente, a seca vai piorar em muitas partes do mundo por causa das mudanças climáticas.

Para avaliar os déficits de precipitação e monitorar a seca, foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), o qual permite determinar a extensão de uma seca em uma dada escala de tempo (resolução temporal) de interesse para qualquer estação de precipitação com dados históricos (NOBRE et al., 2016). Uma das vantagens do SPI é que ele permite comparar registros de precipitação de locais com diferentes condições climáticas (MOREIRA et al., 2008; FERNANDES et al., 2009). Conceitualmente, o SPI representa o z-score, ou seja, o número de desvios padrão acima e abaixo do qual um evento (valor) se

encontra em relação à média. Na Figura 1 está ilustrado o ajuste do SPI em relação à distribuição normal com valor esperado 0 e variância 1.

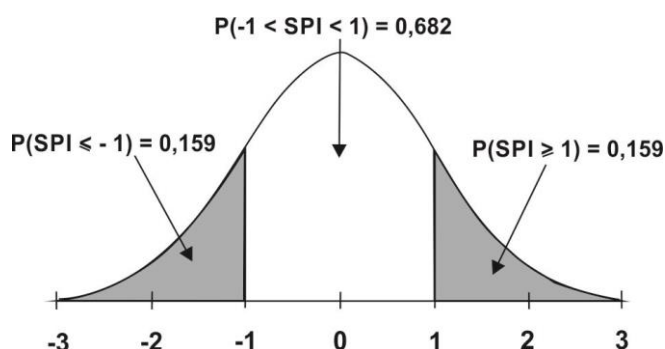


Figura 1 Distribuição normal e os índices SPI.

Fonte: Damberg (2013).

Os valores do índice SPI representam precipitações padronizadas. Santos e Portela (2010) afirmam que um valor do índice igual a zero é indicativo de que não ocorreram desvios nos valores da precipitação relativamente à precipitação média no período analisado. Valores positivos do índice SPI indicam que a precipitação é superior à média e valores negativos indicam que a precipitação é inferior, como acontece em situações de seca meteorológica.

Para Santos et al. (2013), o SPI denota quantidade de precipitação para uma dada escala de tempo, dando a indicação da relação dessa quantidade com uma distribuição normal, indicando então se vai ocorrer um período seco ou chuvoso. Já para Santos e Sansigolo (2010), o SPI é simplesmente a diferença normalizada de uma média móvel das precipitações num dado período de tempo (1, 2, 3, 6, 12 meses), em relação à climatologia desse mesmo período.

O SPI requer interpretações diferentes de acordo com sua escala temporal. Segundo o WMO (2012), o mapa referente a um mês de SPI é semelhante a um mapa que indica a porcentagem de precipitação normal em um período de 30 dias, por exemplo. Se o valor SPI-1 indica uma situação de deficit, significa que a precipitação acumulada nos últimos 30 dias é inferior a precipitação histórica “normal” desse mesmo mês, portanto reflete condições de curto prazo. A sua aplicação pode ser relacionada intimamente com os tipos de secas meteorológicas e sua ligação pode ser relacionada à umidade do solo. A interpretação do SPI1 deve ser feita com cautela e com base na climatologia local, pois, em relação à comparação de regiões com baixos índices pluviométricos, podem ocorrer grandes valores de SPI, mas serem considerados normais para a estação A e não ser o normal para a estação B.

Esse índice SPI foi recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia, em 2009, para uso padrão em países que querem monitorar a seca meteorológica por se tratar de um índice poderoso, flexível e simples de calcular (HAYES et al., 2011). Segundo

Penalba e Rivera (2015), o SPI é o índice de seca meteorológica mais adequado para o sul da América do Sul, quando comparado com outros índices.

A seca varia em espaço, tempo e intensidade e para estar preparado para as consequências da seca sobre o planejamento de água doce e os ambientes de recursos hídricos, a previsão de seca futura é um conhecimento importante (DEO, SAHIN, 2015), pois em um ambiente de mudança, o conhecimento dos prováveis perfis de risco futuros desempenha um papel significativo na tomada de decisões de política pública, por exemplo, a adaptação sociodemográfica às futuras mudanças climáticas (MADSEN et al., 2014).

Hoje, as principais ferramentas de análise destinadas a avaliar o clima que, provavelmente, ocorrerá em futuro próximo e não tão próximo, são os Modelos Climáticos Globais (GCMs) e o *downscaling* dinâmico, usando Modelos Climáticos Regionais (RCMs) (MARENGO et al., 2012). Esses modelos climáticos projetam um clima futuro simulando futuras emissões de gases de efeito estufa, aerossóis e outros forçantes naturais e artificiais moldados pela resposta da Terra a esses forçamentos, juntamente com a variabilidade interna inerente ao sistema climático (COLLINS et al., 2013). Durante as últimas décadas, os GCMs aninhados a RCMs têm sido continuamente melhorados, principalmente devido ao aumento da capacidade computacional e à melhor representação de diferentes componentes do sistema climático: a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre (SOLMAN, 2013).

Diante de um suposto cenário de mudanças climáticas, causadas pelo aquecimento global, com prováveis reduções da disponibilidade hídrica, este estudo tem como objetivo fazer o diagnóstico de eventos de seca meteorológica extrema para o estado do Paraná, relativos ao período de 1980 a 2015 e traçar um cenário desse índice climático para o futuro (2017-2050), com o intuito de auxiliar futuras ações mitigadoras desse fenômeno, ou seja, estar preparado para lidar com a seca antes que ela se estabeleça.

MATERIAL E MÉTODOS

As séries de dados de precipitação para o estado do Paraná foram retiradas da rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA). O período considerado para esse estudo foi de 1980 a 2015, totalizando 324 estações pluviométricas (Figura 2). As falhas foram preenchidas com os valores dos postos vizinhos mais próximos. Para aplicação desse método, foram estabelecidos dois critérios: 1) a correlação (Pearson (r)) entre as séries mensais de precipitação de ambos os observatórios ser superior a 0,7; 2) a distância euclidiana mais

próxima entre altitude, longitude e latitude, com a distância mais curta de 100 km. Na Figura 2 estão representadas, espacialmente, essas estações pluviométricas no estado do Paraná e na Tabela 1 está representada a quantidade de estações pluviométricas para cada mesorregião.

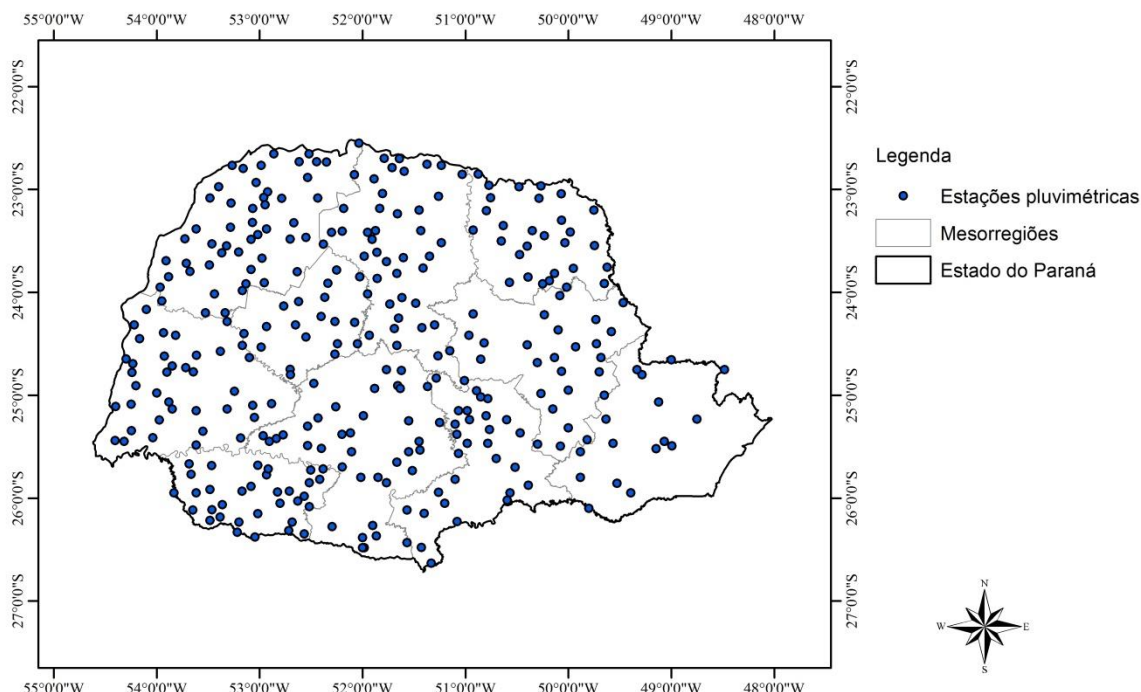


Figura 2 Representação espacial das estações pluviométricas no estado do Paraná.

Os dados pluviométricos para o futuro foram simulados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), utilizando o modelo climático regional Eta, aninhado ao modelo global MIROC5, usando o cenário futuro RCP 4.5 (IPCC, 2014), para um período de 33 anos: 2017-2050. Essa simulação gerou 448 pixels, pertencentes ao estado do Paraná, em uma resolução de 20 x 20 km. Na Figura 3, visualiza-se a disposição desses pontos sobre o estado e na Tabela 7 é apresentada a quantidade de estações pluviométricas para cada mesorregião.

Tabela 1 Quantidade de estações pluviométricas por mesorregião

Mesorregião	Histórico	Futuro
Centro Ocidental	21	26
Centro Oriental	28	52
Centro Sul	38	60
Metropolitana	17	52
Noroeste	51	55
Norte Central	40	53
Norte Pioneiro	29	34
Oeste Paranaense	37	51
Sudeste Paranaense	30	38
Sudoeste Paranaense	33	27

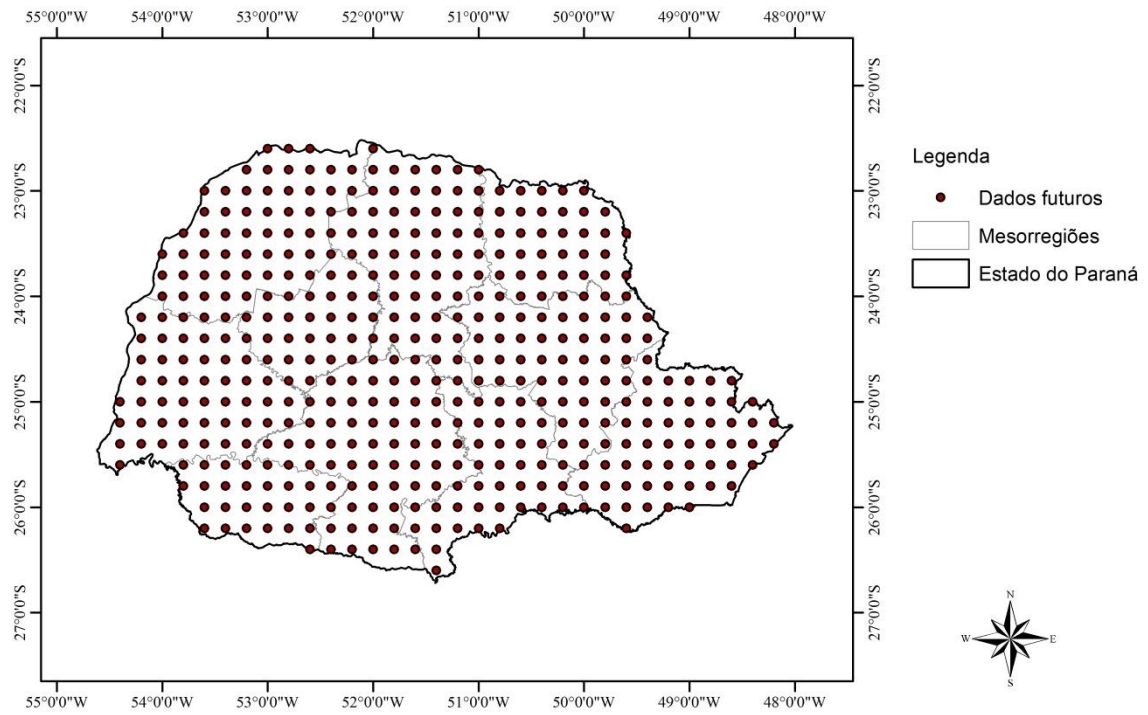


Figura 3 Pontos de estimativa de dados futuros simulados pelo Eta/MIROC5 para o estado do Paraná.

Tanto para a série histórica quanto para a série de dados simulados para o futuro, foi calculado o índice padronizado de seca (SPI) para cada mesorregião do Paraná, pela metodologia proposta por McKee, Doesken e Kleist (1993). Para todas as estações pluviométricas na ordem mensal, totalizando 432 meses para cada estação para as séries históricas e para as séries simuladas para o futuro, o SPI foi calculado para cada pixel, totalizando 408 meses por pixel.

O SPI quantifica o déficit ou o excesso de precipitação em diferentes escalas de tempo e ajusta a série histórica de precipitação a uma distribuição de probabilidade gama, pelo método da máxima verossimilhança, a qual é então transformada em uma distribuição normal. Segundo Altamirano (2010), aplica-se essa transformação pelo fato da precipitação não seguir uma distribuição normal e, dessa forma, a média do SPI para um determinado local e período assume valor zero.

O índice padronizado de precipitação (SPI) foi ajustado às séries a uma distribuição de probabilidade gama, representada pela Equação 8:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (8)$$

onde: α = parâmetro de forma (adimensional);

β = parâmetro de escala (mm);

x = total de precipitação (mm);

Γ = função gama completa - $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$.

Os parâmetros de forma *alfa* e de escala *beta* são estimados para cada estação pluviométrica, para cada mês do ano e para cada escala temporal (SANTOS et al., 2013). Os mesmos são calculados pelo método da máxima verossimilhança:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (10)$$

onde:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x) \quad (11)$$

$\bar{x}$ = é a média da precipitação pluvial (mm);

N = número de observações de precipitação.

Foi necessário fazer uma correção para as não ocorrências de precipitação, visto que a distribuição Gama é indefinida para $x = 0$. Para isso foi utilizado a equação:

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot f(x) \quad \text{para } q = \frac{m}{N} \quad (12)$$

onde: m = número de observações com chuva igual a zero;

N = número de observações com chuva maior ou igual a zero;

q = probabilidade de ocorrência de precipitação zero;

H(x) = distribuição de probabilidade cumulativa;

f(x) = distribuição de probabilidade teórica.

A distribuição de probabilidade gama foi transformada em uma função normal de distribuição de probabilidade, através das equações abaixo:

$$SPI = Z = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (13)$$

$$SPI = Z = + \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{para } 0,5 < H(x) \leq 1 \quad (14)$$

sendo: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$ e $d_3 = 0,001308$, em que:

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (15)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (16)$$

Na Tabela 2, apresenta-se a escala padrão de classificação do SPI, com variação de valores positivos a valores negativos, os quais representam suas respectivas condições climáticas. Para cada valor de SPI ou severidade podem ser associadas probabilidades de ocorrências decorrentes da função densidade de probabilidade normal (BATISTA JUNIOR, 2012).

Tabela 2 Definições de valores e classes do SPI

Valores do SPI	Classes	Probabilidade (%)
$\leq -2,0$	Seca extrema	2,3
-1,99 a -1,50	Seca severa	4,4
-1,49 a -1,00	Seca moderada	9,2
-0,99 a 0,99	Normal	68,2
1,00 a 1,49	Chuva moderada	9,2
1,50 a 1,99	Chuva Severa	4,4
$\geq 2,0$	Chuva extrema	2,3

Fonte: Adaptado de Batista Junior (2012).

Foram selecionados apenas os índices SPI mensais de seca menores ou iguais a 1,5, ou seja, $SPI \leq -1,5$, portanto, apenas os meses classificados como seca severa ou extrema, considerando todo o período de 1980 a 2015 e de 2017 a 2050. Em seguida, para cada estação pluviométrica e para cada ponto de dados simulados, foi calculada a probabilidade de ocorrência de seca severa ou extrema. A interpolação das probabilidades sobre o estado do Paraná foi realizada pelo método de interpolação pela ponderação do inverso da distância (IDW) com o *software* ArcGIS.

Posteriormente, foi feita a frequência acumulada mensal de seca severa e extrema, ou seja, a frequência para valores de $SPI \leq -1,5$, para cada mesorregião, para os períodos citados, com o objetivo de ajustar esses dados a uma série exponencial temporal mensal. Os modelos de suavização exponencial podem ser diferentes dependendo do comportamento da tendência e da sazonalidade da série. A sazonalidade em séries temporais pode ser classificada em: nenhuma (N), aditiva (A) ou multiplicativa (M), e considerando a tendência, pode ser diferenciada em: nenhuma (N), aditiva (A), aditiva amortecida (Ad), multiplicativa (M) ou multiplicativa amortecida (Md).

Na combinação dos tipos desses dois componentes, sazonalidade e tendência, pode-se verificar a existência de 15 métodos, conforme Tabela 3.

O método NN é o de suavização exponencial simples, o AN é o método de Holt, AA é *Holt-Winters* Aditivo e AM é *Holt-Winters* Multiplicativo. Para cada um dos métodos existem erros, aditivos ou multiplicativos. Um modelo MNN é a suavização simples com erro multiplicativo, indicado pelo M. Já um modelo ANN é a suavização simples com erro aditivo, indicado pelo A.

Tabela 3 Métodos de suavização exponencial

Tendência	Sazonalidade		
	Nenhuma	Aditiva	Multiplicativa
Nenhuma	NN	NA	NM
Aditiva	AN	AA	AM
Aditiva amortecida	AaN	AaA	AaM
Multiplicativa	MN	MA	MM
Multiplicativa amortecida	MaN	MaA	MaM

A escolha do melhor modelo se deu por meio do pacote de previsão de Hyndman e Khandakar (2008), por intermédio do pacote *forecast* pelo programa R. Foi utilizado o comando ETS (erro, tendência e sazonalidade). Esse algoritmo determina um modelo temporal adequado, estima os parâmetros e calcula as previsões por meio de modelos que otimizam os parâmetros. A seleção do melhor modelo ocorre de acordo com o critério do *Akaike Information Criterion* (AIC), em que a escolha do melhor modelo é feita através daquele que apresentar o menor valor AIC.

Para a verificação do modelo foi utilizada a estatística de Ljung-Box, no qual também são testadas as autocorrelações dos resíduos estimados, ou seja, testa se os resíduos do modelo são independentes e identicamente distribuídos e são apresentados na forma de p-valor, garantindo, assim, se o modelo estimado é adequado. A estatística de teste de Ljung-Box é feita pelo teste do qui-quadrado χ^2 , baseado na estatística:

$$Q = n(n+2) \sum_{k=1}^h \frac{\hat{\rho}_k^2}{n-k} \quad (17)$$

onde: n é o tamanho da série temporal, $\hat{\rho}_k$ é a autocorrelação estimada da série no intervalo k e m são os números de intervalos a serem testados.

A fim de determinar se a série histórica está correlacionada à série futura, foi feita outra série de dados para cada mesorregião, utilizando os preditos da suavização exponencial da série histórica com o objetivo de saber se existe dependência linear com a série de dados preditos médios futuros, ou seja, se as duas séries ajustadas pelo modelo de suavização exponencial estão correlacionadas. Foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, mas como pressuposto, e foi testada a normalidade dos dados através do teste de Shapiro Wilk.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os meses com maiores ocorrências de seca severa e extrema para o período de 1980-2015, considerando as 324 estações pluviométricas, divididas por mesorregião no estado do Paraná, estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 Meses com maiores secas severas e extremas no período de 1980-2015

Estações					Estações				
Centro Ocidental (21)					Norte Central (40)				
21	Jul-88	Jun-02	Fev-05	Mai-11	39	Fev-05			
20	Sep-88	Jun-07			35	Jul-88	Fev-90		
18	Mai-81				34	Mai-81			
17	Mai-06				33	Jan-92	Mai-11		
16	Jan-82	Nov-99	Out-14		32	Abr-09			
Estações					Estações				
Centro Oriental (28)					Norte Pioneiro (29)				
19	Nov-98	Set-94			28	Abr-00	Set-11		
18	Jul-88				27	Mai-11			
17	Jun-86	Nov-88	Abri-00	Jun-07	26	Jun-86	Abr-02	Mai-06	
	Abr-09				25	Mai-81	Jul-88	Nov-98	
16	Mai-16				24	Jan-92	Fev-05		
15	Jul-86	Mai-96	Out-14						
Estações					Estações				
Centro Sul (38)					Oeste (37)				
21	Jul-88	Ago-12			37	Mai-06	Jun-07		
20	Fev-05	Mai-06			35	Jul-88			
19	Jul-81	Jan-85	Jun-86	Set-88	34	Jul-81			
17	Jan-82	Out-84			32	Set-88	Out-99		
16	Dec-85	Fev-91	Jun-07		31	Mai-11	Out-14		
Estações					Estações				
Metropolitana (17)					Sudeste (30)				
17	Jun-07				29	Jun-07			
16	Out-84	Set-94	Nov-98		28	Out-84	Jun-86	Jul-88	
15	Mai-96	Abr-00			26	Jan-85			
14	Jun-86	Jul-88	Jul-91		25	Jan-82	Mai-06		
12	Jan-82	Set-82			23	Abr-82	Set-82	Nov-88	Fev-05
Estações					Estações				
Noroeste (51)					Sudoeste (33)				
50	Fev-05				33	Jul-88	Mai-06		
47	Abr-02				32	Jul-81	Jan-82	Ago-12	
46	Jul-88				31	Set-88	Fev-05		
45	Set-07				30	Mai-95	Jun-07		
43	Jan-92				29	Jan-85			

Fevereiro de 2005 foi um mês que ocorreu seca severa e extrema em 238 estações pluviométricas no Paraná, das 324 estações analisadas, isso representa um total de 73,5%. Essa informação corrobora o estudo feito por Marengo (2007), que afirmou que de dezembro/2004 a março/2005 toda a região sul do Brasil sofreu um período crítico de déficit de precipitação e que a consequência dessa seca foi a maior quebra de safra agrícola da história; o Paraná perdeu 1,63 milhões de toneladas de grãos.

A análise feita por Silva et al. (2015) sobre a precipitação de Pato Branco e Planalto, cidades situadas na mesorregião Sudoeste, constou que as chuvas diárias no período de 8 de julho a 16 de agosto de 1988, em Pato Branco, e de 10 de julho a 16 de agosto em Planalto, não ultrapassaram 1 mm. Conforme dados da Tabela 4, o mês de julho de 1988 indicou seca severa e extrema para essa mesorregião, assim como o mês de setembro de 1988 indicou um forte período sem chuva.

O modelo de ajuste das séries de cada mesorregião a uma série temporal, utilizando a série de frequência acumulada mensal de seca severa e extrema, para o histórico de 1980-2015 e para o período futuro de 2017-2050, utilizando os valores simulados pelo modelo Eta/MIROC5, está representado pela Tabela 5. Nessa mesma tabela estão os resultados da verificação do modelo, pela estatística de Ljung-Box, na qual se verifica se os resíduos são independentes e identicamente distribuídos.

Tabela 5 Ajuste do modelo ideal utilizando ETS para séries históricas e futuras de secas severas e extremas e verificação do modelo pelo teste Ljung-Box

Mesorregião	Histórico		Futuro	
	ETS	Ljung-Box p-valor	ETS	Ljung-Box p-valor
Centro Ocidental	ANN	0.4505	ANN	0.8527
Centro Oriental	ANN	0.5608	ANN	0.1905
Centro Sul	ANN	0.8855	ANN	0.8691
Metropolitana	ANN	0.8743	ANN	0.7924
Noroeste	ANN	0.5481	ANN	0.2999
Norte Central	ANN	0.9571	ANN	0.4298
Norte Pioneiro	ANN	0.5761	ANN*/Holt	0.04304*
Oeste Paranaense	ANN	0.9021	ANN	0.7528
Sudeste Paranaense	ANN	1.0000	ANN	0.9609
Sudoeste Paranaense	ANN	0.7800	ANN*/HoltB	0.0083*

Nota: * p-valor $\leq 0,05$ – ANN* o modelo não foi atestado.

Observando a Tabela 5, verifica-se que, tanto para as séries históricas de secas severas e extremas quanto para as séries simuladas para o futuro, o modelo de séries temporais indicado pelo pacote de previsão de Hyndman e Khandakar (2008), foi o modelo de suavização exponencial simples (ANN). De acordo com Lucio et al. (2010), o nome “suavização” provém do fato de que a série depois de reduzida a seus componentes estruturais terá menor número de variações bruscas, mostrando um comportamento mais mediano. O termo “exponencial” aparece, porque os processos de suavização envolvem as médias aritméticas ponderadas, em que os pesos decrescem exponencialmente na medida em que se avança no passado. Esse modelo ANN não foi atestado com nível de significância de 5%, pelo teste de Ljung-Box, para as séries simuladas para o futuro para as mesorregiões Norte Pioneiro e Sudoeste Paranaense, indicando autocorrelação dos resíduos. Para todas as outras mesorregiões o modelo mostrou-se adequado tanto para a série simulada para o futuro quanto para a série histórica.

Ajustando a série das mesorregiões Norte Pioneiro e Sudoeste Paranaense para outros tipos de suavização exponencial, o modelo adequado para a mesorregião Norte Pioneiro, foi o modelo de suavização exponencial de *Holt* (*Ljung Box* p-valor=0,0519), portanto a um nível de 5% de significância, esse modelo se mostrou o ideal. Para a mesorregião Sudoeste, o modelo adequado foi o de suavização exponencial de *Holt-winters*, considerando o componente de nível (α) e tendência (β) (*Ljung-Box* p-valor=0,05038).

Nas figuras 4 e 5 estão indicados os ajustes ideais dos modelos, tanto para as séries históricas quanto para as séries simuladas para o futuro, para todas as mesorregiões.

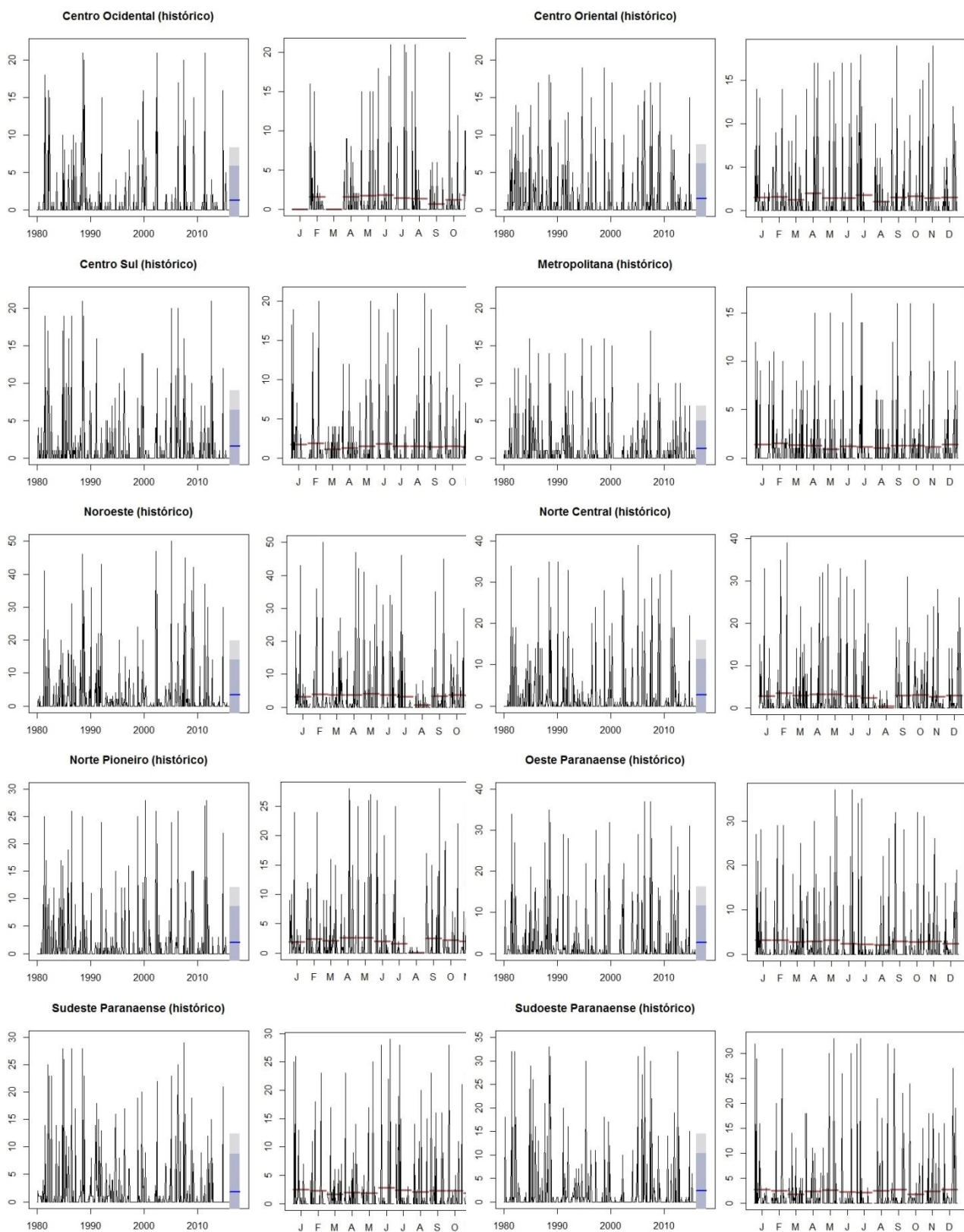


Figura 4 Gráficos da série temporal considerando os eventos ocorridos de seca extrema e severa para o período de 1980 a 2015, para todas as mesorregiões do Paraná e para cada mês desse período.

Pode-se verificar na Figura 4 que, em todas as mesorregiões e em vários meses, ocorreram os eventos de seca severa e extrema para o período de 1980 a 2015. A variabilidade desse evento climático é grande em todo o estado do Paraná, pelo fato que alguns meses têm grandes eventos de secas severas e extremas e em outros meses há pouca frequência. Somente na mesorregião Centro Ocidental, os meses de janeiro e março de 1980 a 2015 não ocorreram secas severas e extremas. A ocorrência de não seca não aconteceu em nenhum outro mês em todo o estado do Paraná.

No Paraná, Nery e Carfan (2012) também notaram essa variabilidade da chuva e dizem que é tanto espacial quanto temporal que este fenômeno aconteça, sendo que chove menos ao norte e noroeste do estado. Na Figura 4, verifica-se que a frequência do SPI para o Noroeste, Norte Central e Norte Pioneiro, ocorre no máximo a cerca de 50, 40 e 30 SPI $\leq -1,5$ /mês. Comparando com outras mesorregiões, o Oeste Paranaense, Sudeste e Sudoeste têm a frequência máxima de 40, 30 e 35, e as demais mesorregiões em cerca de 20. Portanto, para o Noroeste e Norte Central, ratificando Nery e Carfan (2012).

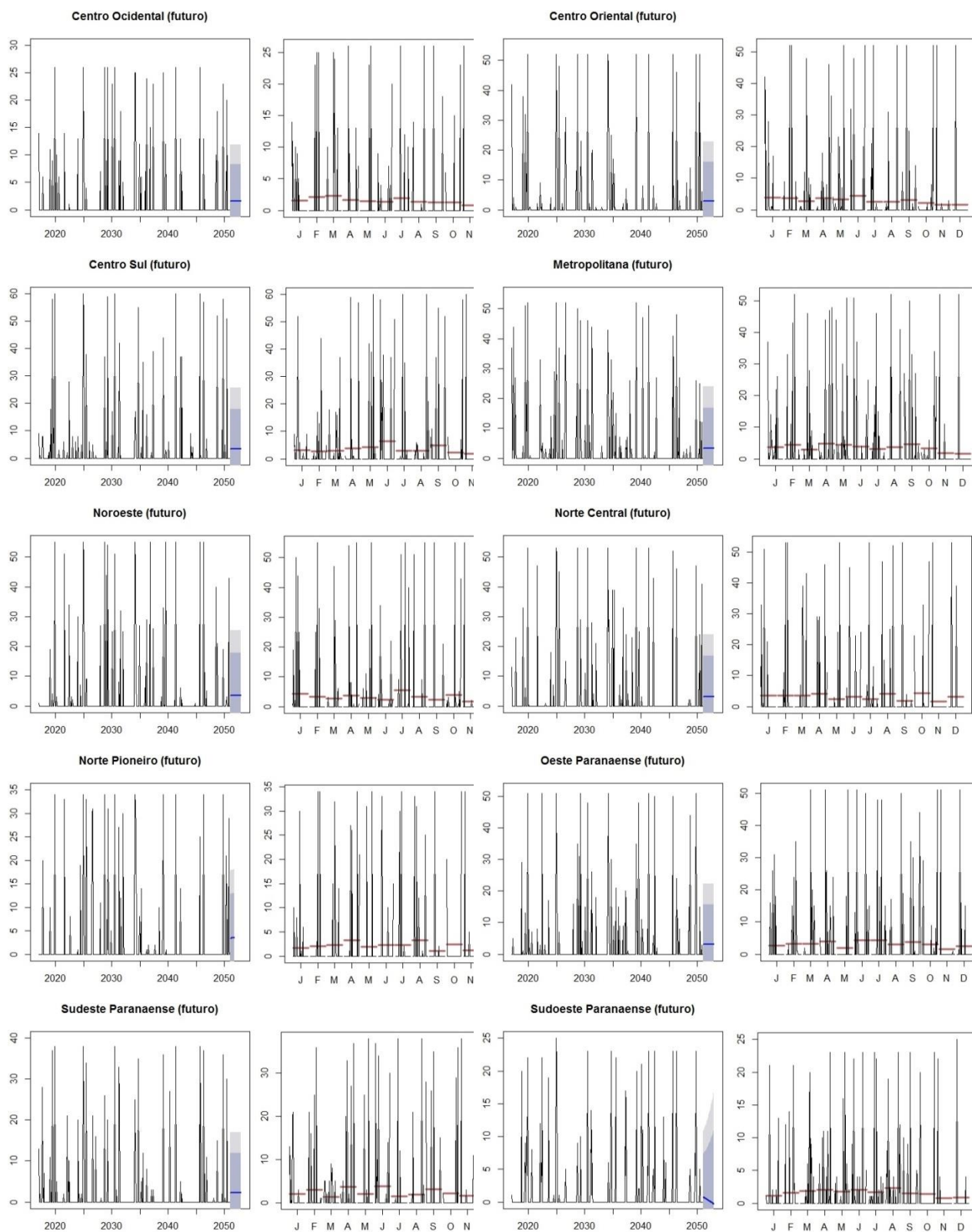


Figura 5 Gráficos da série temporal considerando a possibilidade de frequência de seca extrema e severa para todas as mesorregiões do Paraná para o período de 2017 a 2050 e para cada mês desse período

Na Figura 5 visualiza-se um cenário para o futuro com períodos marcados pela possibilidade de seca severa e extrema, mas com menos frequência, porém maior intensidade, pois a ordenada do gráfico que representa a frequência do evento aumentou de escala em praticamente todas as mesorregiões, exceto no Sudoeste Paranaense. Esse fato é contraditório à análise de Silva et al. (2015), que relatam que o Sudoeste apresenta tendência significativa de elevação do número máximo de dias secos consecutivos no ano.

O teste de Shapiro Wilk indica a normalidade dos preditos do ajuste do modelo, tanto para a série histórica quanto para a série futura, pelo fato de todos os p-valores serem maiores que 0,05, portanto, não há evidência para rejeitar H_0 , logo, as séries históricas e futuras dos preditos de todas as mesorregiões têm distribuição normal (Tabela 6).

De acordo com o teste de hipótese da correlação de Pearson aplicado, apenas a região sudeste do Paraná apresenta correlação significativa num nível de significância de 5%, pois seu p-valor foi menor que 0,05, mas, observando os valores de correlação de Pearson, observa-se que todos os valores apresentam um grau de correlação baixo, indicando, assim, que existe uma mudança de cenário de seca severa e extrema para todas as mesorregiões do estado do Paraná, ou seja, não há associação entre os períodos.

Tabela 6 Teste de Shapiro Wilk e correlação de Pearson

Mesorregião	Shapiro (hist.) p-valor	Shapiro(fut.) p-valor	Pearson	P-valor
Centro Ocidental	0,934	0,1286	-0,5005956	0,09739
Centro Oriental	0,7415	0,9078	0,4532	0,2396034
Centro Sul	0,2583	0,1642	-0,4610674	0,1314
Metropolitana	0,2312	0,3789	-0,4051965	0,1913
Noroeste	0,1837	0,1218	-0,1323959	0,6817
Norte Central	0,1499	0,7927	0,4582318	0,1341
Norte Pioneiro	0,2714	0,1647	-0,1368283	0,6715
Oeste Paranaense	0,4848	0,08814	-0,5088124	0,09115
Sudeste Paranaense	0,2832	0,9285	-0,6658442	0,01809*
Sudoeste Paranaense	0,5988	0,5872	-0,01015112	0,975

Para comparar os cenários de seca severa e extrema para o período de 1980 a 2015 com o período de 2017 a 2050, foi feito o mapa de probabilidade de ocorrência de seca, considerando os valores de $SPI \leq -1,5$, representados pelas figuras 6 e 7.

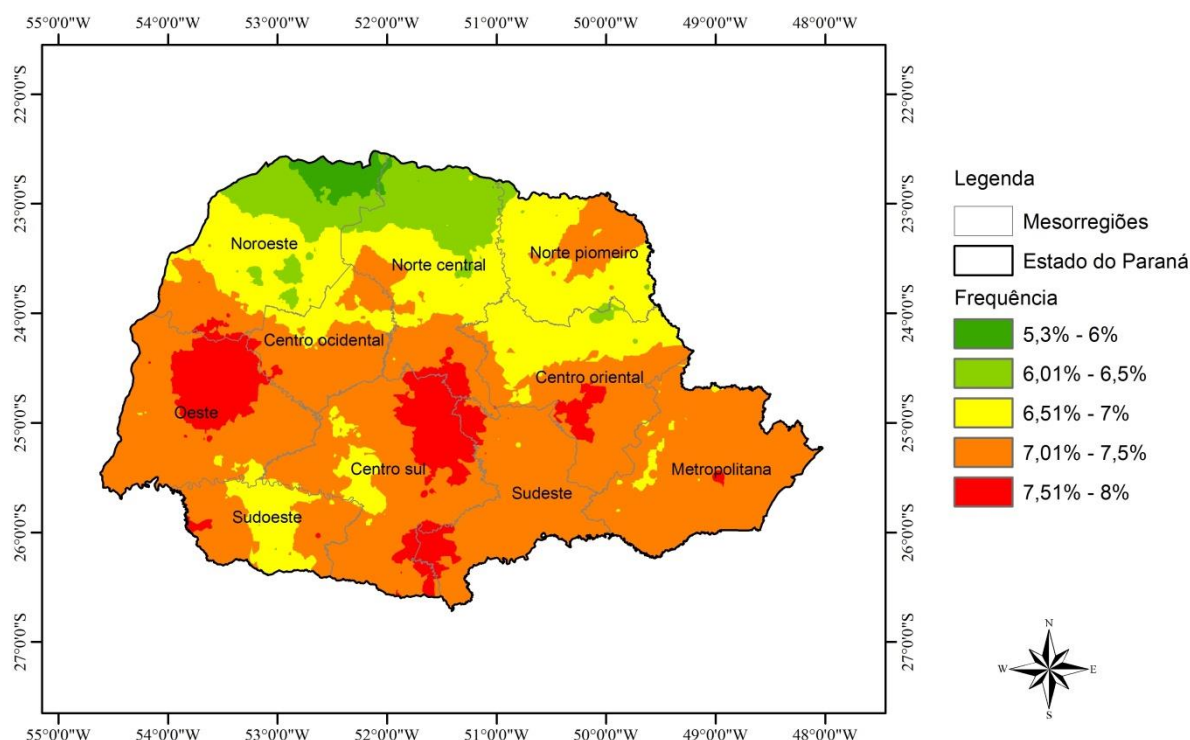


Figura 6 Ocorrência de seca severa e extrema em porcentagem para o período de 1980-2015 sobre o estado do Paraná.

As maiores ocorrências aconteceram ao Norte da mesorregião Oeste e também ao Nordeste da mesorregião Centro-Sul, perpassando pelo Sul da mesorregião Norte-central e também um pequeno espaço do noroeste da mesorregião Sudeste. É importante salientar que, segundo McKee, Doesken e Kleist (1993), como o SPI tem uma distribuição normal, a probabilidade dos valores se classificarem como seca severa é de 4,4% e como seca extrema de 2,3%, totalizando 6,7%. No Paraná, considerando-se o período de 1980-2015, na maioria do Estado ocorreram valores maiores que 7,1% de ocorrência de seca severa e extrema em praticamente todo o território.

Pela Figura 7, verifica-se que as maiores probabilidade de seca simulada pelo modelo Eta/Miroc5 e calculado pelo índice SPI para um futuro até 2050, estão concentradas na mesorregião Metropolitana, na região Norte da mesorregião Oeste e também na região Sudoeste da mesorregião Noroeste. O que chama atenção é a acentuada concentração na região Metropolitana, e uma das possíveis causas seja a ilha urbana de calor que possa vir a se desenvolver na capital paranaense, fato constatado Krüger e Rossi (2015). Esses autores constatarem que, ao se comparar as condições atmosféricas da década de 1960 com a atual, os resultados apontam uma intensificação da ilha de calor na capital paranaense. Para a cidade de São Paulo, Marengo et al. (2015) observaram uma diminuição relativa das chuvas sobre o Sistema Cantareira nas últimas décadas (desde 1990) e um aumento das chuvas sobre a cidade de São Paulo e supõem que esse efeito de longo prazo pode estar relacionado à ilha urbana de calor, mas relatam que estudos em andamento precisarão comprovar.

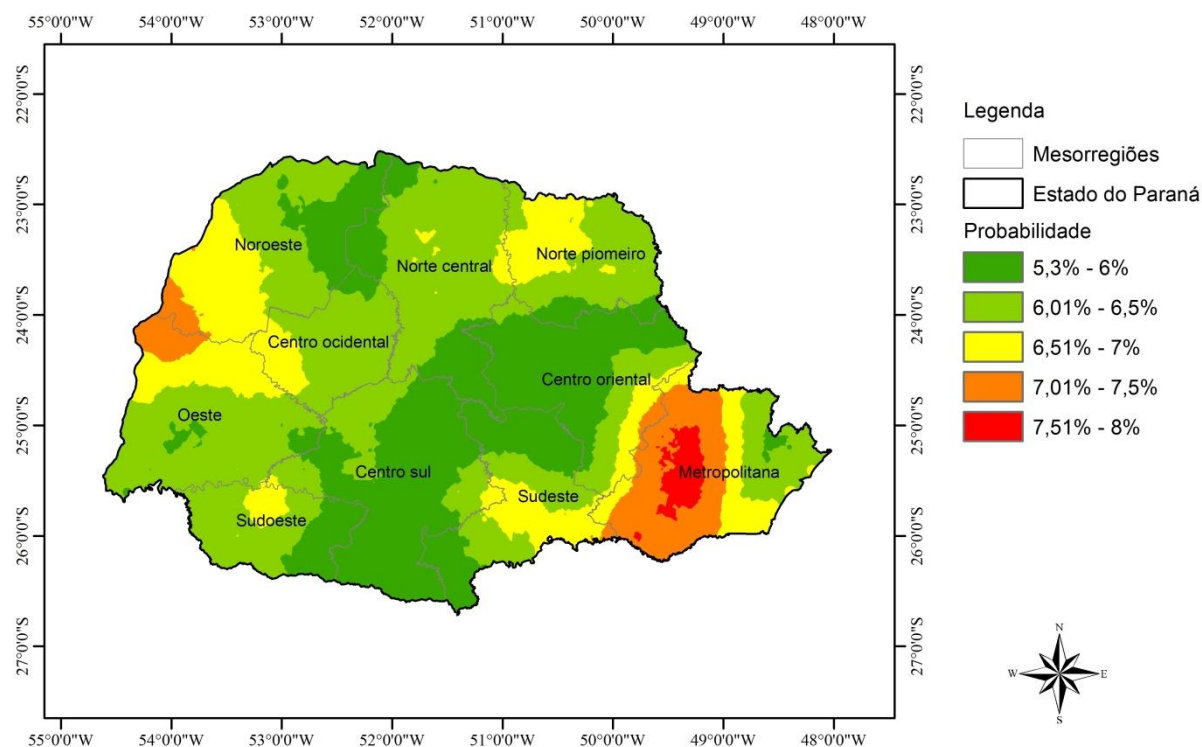


Figura 7 Probabilidade de ocorrência futura de seca severa e extrema para o período de 2017-2050 sobre o estado do Paraná.

Relacionando o mapa da Figura 6 com o da Figura 7, verifica-se que a projeção de probabilidade de seca severa e extrema diminui em todo o Paraná e que, principalmente, a mesorregião Centro sul, Sudeste, Centro oriental e Oeste diferem o cenário quando comparado o histórico de ocorrência com a probabilidade calculada para o futuro, corroborando a falta de correlação da série dos preditos históricos com os preditos futuros.

Comparando esse estudo com o de Pinheiro, Graciano e Severo (2013), que analisaram séries temporais diárias, mensais e anuais de 18 estações pluviométricas (superiores a 50 anos), sendo 8 localizadas no Paraná, 5 em Santa Catarina e 5 no Rio Grande do Sul, estes autores afirmaram que, nas análises das séries mensais e anuais evidenciaram tendências estatisticamente significativas, ao nível de 5% de aumento da precipitação, este estudo reforça essa tendência. Já Silva et al. (2015) afirmaram que a maior parte dos indicadores de extremos climáticos associados à precipitação mostrou-se sem significância estatística.

CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos e os resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se concluir que:

- apesar de no estado do Paraná não haver grandes problemas com secas, foi constada uma ocorrência de seca severa e extrema em porcentagem, acima do padrão normal do SPI para o período de 1980-2015;
- os resultados também apresentaram variabilidade no índice de seca severa e extrema, tanto na série histórica quanto na série futura;
- para os dados simulados para o futuro, constata-se uma menor frequência e maior intensidade de seca severa e extrema até 2050;
- comparando o histórico de ocorrência de seca severa e extrema, em porcentagem, de 1980-2015 com os dados de probabilidade futuro até 2050, simulada pelo Eta/MIROC5, verificou-se uma diferença de cenário, indicando diminuição do índice de seca sobre o estado do Paraná.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, T. M. A. **Estudo dos processos de gestão de seca: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2010. 425 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2010.

ALTAMIRANO, R. J. A. **Climatologia dos eventos chuvosos e secos severos, extremos e muito extremos usando o índice de precipitação normalizada (SPI) para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos – SP, 2010.

BATISTA JUNIOR, W.; **Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do rio Guandu – Espírito Santo**. 2012. 146 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2012.

COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J. L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAO, X.; GUTOWSKI, W. J.; JOHNS, T.; KRINNER, G.; SHONGWE, M.; TeBALDI, C.; WEAVER, A. J.; WEHNER, M. Long-term Climate Change: projections, commitments and irreversibility. *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. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. p. 1029–1136.

DAMBERG, L. **Analysis of Trends and Patterns of Droughts Using Satellite Data and Climate Model Simulations**. 2013. 70 f. Dissertation (Department of Building and Environmental Technology) – Lund University, Lund – Sweden, 2013.

DEO, R. C.; SAHIN, M. Application of the extreme learning machine algorithm for the prediction of monthly Effective Drought Index in eastern Australia. **Atmospheric Research Journal**. v. 153, p. 512-525, 2015.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIN, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índices para quantificação da seca**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009 (Documento técnico).

HAYES, M.; SVOBODA, M.; WALL, N.; WIDHALM, M. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **American Meteorological Society**. Washington DC - USA, v. 92, n. 4, p. 485-488, 2011.

HYNDMAN, R. J.; KHANDAKAR, Y. Automatic time series forecasting: the forecast package for R. **Journal of Statistical Software**. v. 27, n. 3, p. 1-22, 2008.

KRÜGER, E.; ROSSI, F. Quantificação da ilha de calor de Curitiba considerando aspectos de estabilidade atmosférica. **Brasileira de Meteorologia**. São José dos Campos SP, v. 30, n. 4, p. 394-404, 2015.

LUCIO, P. S.; SILVA, F. D. S.; FORTES, L. T. G.; SANTOS, L. A. R.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; BALBINO, H. T.; SARMAHO, G. F.; SANTOS, L. S. F. C.; LUCAS, E. W. M.; BARBOSA, T. F.; DIAS, P. L. S. Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil. **Brasileira de Meteorologia**. São José dos Campos SP, v. 25, n. 1, p. 70-87, 2010.

MADSEN, H.; LAWRENCE, D.; LANG, M.; MARTINKOVA, M.; KJELDSEN, T. R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. **Journal of Hydrology**. v. 519, p. 3634-3650, 2014.

MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no século XX e cenários no Brasil e na América do Sul para o século XXI Derivados do Modelo de Clima do IPCC**. Relatório nº 1. São Paulo, 2007.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate changes scenarios in South America using the Eta CPETEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and Paraná river basins. **Journal Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGON, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. USP. n.106, p. 31-44, 2015.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8, 17-22 Jan. 1993, Anaheim, California, 1993. p. 1-6.

MOREIRA, E. E.; COELHO, C. A.; PAULO, A. A.; PEREIRA, L. S.; MEXIA, J. T. SPI-based drought category prediction using loglinear models. **Journal of Hydrology**, v. 354, p. 116-130, 2008.

NERY, J. T.; CARFAN, A. C. Análise da Chuva no estado do Paraná. XI CONGRESO ARGENTINO DE METEOROLOGÍA, 11, 2012, Mendoza - Argentina. **Anais...** Mendoza – Argentina: Centro Argentino de Meteorólogos, 2012.

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, L. A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Water Resource and Protection**. v. 8, p. 252-262, 2016.

PENALBA, O. C.; RIVERA, J. A. Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica, **Meteorológica**, v. 40, p. 33–57, 2015.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendências das séries temporais de precipitação da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos – SP, v. 28, n. 3, p. 281-290, 2013.

SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. **Caracterização de secas em bacias hidrográficas de Portugal Continental**: aplicação do índice de precipitação padronizada, SPI, a séries de precipitação e de escoamento. In: CONGRESSO DA ÁGUA. 10, 2010, Portugal. **Anais...** Portugal: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos; Repositório digital do Instituto Politécnico de Beja, Disponível em: <<http://comum.rcaap.pt/handle/123456789/1307>>. Acesso em: 2 out. 2013.

SANTOS, T. S.; GOMES, A. C. S.; COUTINHO, M. D. L.; SILVA, A. R.; CASTRO, A. A. Análise de eventos extremos na região Amazônica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 4, p. 1356-1370, 2013.

SANTOS, T. S.; SANSIGOLO, C. A. Frequência de eventos secos e chuvosos na Amazônia usando o índice de precipitação normalizada (SPI). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2010, Belém – PA. **Anais...** Belém – PA: Associação Brasileira de Meteorologia, 2010. p. 1140-1147.

SENEVIRATNE, S. I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C. M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCLNESS, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X. **Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, 2012**. Disponível em: <http://ipcc.ch/pdf/presentations/SREX_geneva_march2012/ipcc_srex_seneviratne_geneva_201203.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2014.

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C.; CHANG, M.; FREITAS, M.; MACHADO, B. J.; TRISTÃO, L.; RUGGERI, J. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Brasileira de Meteorologia**. São José dos Campos SP, v. 30, n. 2, p. 181-194, 2015.

SOLMAN, S. A. Regional climate modeling over South America: a review. **Advances in Meteorology**. p. 1-13, 2013.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; BACELAR, L. C. S.; SILVA, G. M.; COUTO, R. S. Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 8, n. 3, p. 203-213, 2013.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Standardized organization index: User Guide**. Geneva – Switzerland, 2012. 24 f.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse estudo foi possível desenvolver um panorama da seca severa e extrema no estado do Paraná, espacial e temporalmente, tanto no passado quanto no futuro. O que chamou a atenção foram as ocorrências de seca no período de 1980 a 2015, pois, apesar de o Paraná ser um Estado que não sofre com esse evento climático, comparado a outros estados do Brasil, confirmou-se que, em alguns momentos, existiu sim esse evento, em uma ocorrência maior que a esperada.

Também mostra-se um cenário futuro, para o qual sugerem-se outros estudos, utilizando diferentes modelos climáticos globais para ser possível comparar esse cenário com outros. Indica-se a utilização de outros índices de seca, incluindo temperatura, evapotranspiração e outras variáveis ou, também, o próprio índice padronizado de seca (SPI), mas ajustando as séries de dados a outras distribuições de probabilidades e, também, incluindo os índices SPI-2, SPI-3, SPI-6 e SPI-12. Outra metodologia interessante seria o uso de redes neurais ou também outros ajustes de séries temporais, como ARIMA, cadeia de Markov, entre outros, para, assim, ter-se uma maior confiabilidade, para a tomada de medidas preventivas tanto a curto quanto a médio e longo prazos.

Também fez-se uma exposição da precipitação no Estado, utilizando dados históricos e futuros, mostrando um aumento de tendência de precipitação, mas com uma variabilidade enorme. Neste caso, sugere-se o estudo de outros eventos extremos climáticos, como chuva intensa e ondas de calor.

Vale ressaltar o banco de dados que inclui essa pesquisa, são dados diários de precipitação de janeiro de 1980 a dezembro de 2015 de 324 estações pluviométricas e dados simulados de precipitação diária, através do modelo global MIROC5 aninhado ao modelo regional Eta de janeiro de 2017 a dezembro de 2050, numa malha de 828 pixels sobre o Estado e sua fronteira. Esse banco de dados possui séries de dados de precipitação diária que estão com as falhas preenchidas e também tem o acumulo mensal, além do índice padronizado de seca SPI1 para ambos os períodos. Além disso, é público e pode servir de base para futuras pesquisas.

APÊNDICES