

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO E CONSERVAÇÃO
DO SOLO E DA ÁGUA**



TESE

**ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER MODIFICADO PARA AS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

SUÉLEN CRISTIANE RIEMER DA SILVEIRA

Pelotas, 2019

SUÉLEN CRISTIANE RIEMER DA SILVEIRA

**ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER MODIFICADO PARA AS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Ciências

Orientadora: Professora Dr^a. Cláudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra

Co-orientadora: Professora Dr^a. Rita de Cássia Fraga Damé

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S587i Silveira, Suélen Cristiane Riemer da

Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para as condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul / Suélen Cristiane Riemer da Silveira ; Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra, orientadora ; Rita de Cássia Fraga Damé, coorientadora. — Pelotas, 2019.

127 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. PDSI. 2. Balanço hídrico climatológico. 3. Evapotranspiração de referência. 4. Capacidade de água disponível. I. Teixeira-Gandra, Claudia Fernanda Almeida, orient. II. Damé, Rita de Cássia Fraga, coorient. III. Título.

CDD : 631.4

Suélen Cristiane Riemer da Silveira

ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER MODIFICADO PARA AS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO O RIO GRANDE DO SUL

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 11/09/2019

Banca examinadora:

.....
Prof^a. Dr^a. Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra (Orientadora)

Doutora em Agronomia na área de Solos e Nutrição de Plantas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo.

.....
Prof. Dr. Marcelo Peske Hartwig

Doutor em Ciências na área de Irrigação e Drenagem pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo.

.....
Prof. Dr. Edgar Ricardo Schöffel

Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

.....
Prof. Dr. Tonismar dos Santos Pereira

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria

*Dedico este trabalho aos meus pais Silma e Selmar,
com todo amor, carinho e gratidão.*

Agradecimento

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, pela oportunidade de realizar essa etapa importante na minha vida profissional e pessoal, por confortar meu coração nos momentos mais difíceis e me amparar nos momentos de angústia e sofrimento.

Aos meus pais, por me darem a vida, por me incentivarem a realizar os meus sonhos, que por muitas vezes abriram mão de seus próprios sonhos em favor de suas filhas. Obrigado por todo amor e educação, eu amo vocês.

A minha orientadora professora Dr.^a Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra, agradeço pelas orientações, pela contribuição no processo de formação e construção do conhecimento e crescimento profissional, por confiar em mim e principalmente mostrar que somos capazes de superar nossos desafios, agradeço pela paciência, compreensão e carinho nos momentos mais difíceis desta caminhada. Agradeço pela oportunidade de realização do mestrado e doutorado e por ser uma ótima profissional e exemplo de mulher.

À Professora Dr.^a Rita de Cássia Fraga Damé, pela co-orientação do trabalho, pelo conhecimento compartilhado e ensinamentos, pela confiança, carinho e por ser essa pessoa confiante e alegre, que nos inspira a buscar a realização de nossos sonhos.

Aos colegas do PPG-MACSA obrigado pela parceria e pelas amizades construídas nesta caminhada.

Às colegas Emanuele, Roberta e Letícia pela amizade construída, pelo convívio, força e apoio nos momentos difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pela oportunidade de realizar o doutorado. Aos professores, por toda a experiência e conhecimento compartilhados, para minha formação profissional.

À banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar e colaborar para o aprimoramento desta pesquisa.

Resumo

SILVEIRA, S.C.R. **Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para as condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul**. 2019. 127f. Tese (Doutorado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, 2019.

O Rio Grande do Sul é uma região de clima temperado úmido, com chuvas distribuídas ao longo do ano, e mesmo assim apresenta períodos de ocorrência de eventos de seca. A seca é um fenômeno natural que se caracteriza pela redução da quantidade de precipitação de uma região, em um determinado período, em relação ao climatologicamente esperado. No sentido de caracterizar esse fenômeno são utilizados alguns índices que possibilitam quantificar e classificar o evento, espacial e temporalmente. Nesse sentido, tem-se o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), que vem sendo utilizado mundialmente para a quantificação da severidade da seca. O PDSI utiliza como dados de entrada todos aqueles necessários para os cálculos do Balanço Hídrico Climatológico, Evapotranspiração de Referência (ET_0) e Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD). Para que o referido índice possa ser utilizado mundialmente, Palmer (1965) ponderou o fator de caracterização climática “K”, baseado em dados climáticos de nove localidades dos Estados Unidos. Assim, objetivou-se avaliar e adaptar o PDSI às condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul, utilizando a Evapotranspiração de Referência obtida pelos métodos de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO), bem como os valores de CAD de 50, 75 e 100 mm. Para a modificação do índice e a realização dos cálculos de Evapotranspiração de Referência foi utilizado o banco de dados de Xavier et al. (2016), considerando o período de 1980 a 2013 para todo o Estado. Os resultados obtidos na modificação do fator de caracterização climática (K) para as 216 localidades, utilizando a estimativa de ET_0 por Thornthwaite (1948) e valores de CAD de 50, 75 e 100 mm, foram de 23,37, 23,46 e 23,42, respectivamente. Para o método de Penman-Monteith (FAO) e valores de CAD de 50, 75 e 100 mm, os valores foram 24,20, 24,26 e 24,29, respectivamente. A calibração do novo índice PDSI-RS, com os novos valores de K permitiu uma nova classificação nas classes de severidade da seca, sendo seca suave, moderada, severa e extrema. Conclui-se que o índice PDSI-RS modificado para as duas metodologias de ET_0 e diferentes valores de CAD's, para as condições climáticas do Estado, trouxe valores mais confiáveis para o monitoramento dos períodos de seca para a região de estudo, bem como uma nova classificação da severidade de ocorrências de seca.

Palavras-chaves: PDSI, Balanço hídrico climatológico, Evapotranspiração de referência, Capacidade de água disponível

Abstract

SILVEIRA, S.C.R. **Modification of the Palmer Drought Severity Index for the climatic conditions of Rio Grande do Sul state.** 2019. 127f. Thesis (Doctorate in Soil and Water Management and Conservation) - Postgraduate Program in Soil and Water Management and Conservation, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, 2019.

Rio Grande do Sul state is a region of humid temperate climate, with rains distributed throughout the year, yet is a region which also experiences periods of drought. Drought is a natural phenomenon characterized by a reduced precipitation in a region, during a certain period of time, in relation to what is climatologically expected. In order to characterize this phenomenon, indices are used to quantify and classify the event, both spatially and temporally. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) has been used worldwide to quantify drought severity, utilizing all the required information for calculations of climatic water balance, reference evapotranspiration (ET_0) and soil available water capacity (AWC) as input data. In order for this index to be used worldwide, Palmer (1965) weighted the climate characterization factor "K", based on climate data from nine locations in the United States of America. The objective of the current study was to evaluate and adapt the PDSI to the climatic conditions of the state of Rio Grande do Sul (RS), using the ET_0 obtained by the methods of Thornthwaite (1948) and Penman-Monteith (FAO), as well as AWC values of 50, 75 and 100 mm. To modify the index and perform reference evapotranspiration calculations, the database of Xavier et al. (2016) was used, considering the period from 1980 to 2013 for the entire state. The results obtained from the modification of the climatic characterization factor (K) for the 216 localities using Thornthwaite (1948) ET_0 estimate and AWC values of 50, 75 and 100 mm, were 23.37, 23.46 and 23.42, respectively. Using the Penman-Monteith (FAO) method (FAO), AWC values of 50, 75 and 100 mm were found to be 24.20, 24.26 and 24.29, respectively. The PDSI-RS index calibration with the new K values allowed for the following new classification of drought severity classes: mild, moderate, severe and extreme drought. It can therefore be concluded that the modified PDSI-RS index for both ET_0 methodologies and different AWC values for the state climatic conditions, generated more reliable values for monitoring drought periods in the region of study, as well as allowed for a new severity classification of drought occurrences.

Keyword: PDSI, Climatic water balance, Evapotranspiration reference, Available water capacity

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 HIPÓTESE	22
3 OBJETIVOS	23
3.1 Geral.....	23
3.2 Específicos	23
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
4.1 O Clima do Rio Grande do Sul	24
4.2 Definição de Seca	26
4.3 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	29
4.4 Balanço Hídrico Climatológico (BHC).....	32
4.4.1 Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD)	33
4.5 Evapotranspiração.....	34
4.5.1 Evapotranspiração de Referência (ET ₀)	35
4.5.2 Evapotranspiração de Referência por Thornthwaite (1948)	35
4.5.3 Evapotranspiração de Referência por Penman-Monteith (FAO)	36
4.6 Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer	37
5 MATERIAL E MÉTODOS	40
5.1 Classificação do Clima e da Região de Estudo	40
5.2 Dados Meteorológicos	40
5.3 Validação de dados observados e dados simulados	41
5.4 Balanço Hídrico Climatológico (BHC)	43
5.4.1 Metodologia de Thornthwaite (1948).....	43
5.4.2 Metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	44
5.5 Determinação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	45
5.6 Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	52
5.6.1 Primeira aproximação do fator de Caracterização Climática (K)	52
5.6.2 Modificação do Índice de Severidade de Palmer para as condições climáticas do Rio Grande do Sul.....	55

5.7	Análise das séries temporais para o Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o estado do Rio Grande do Sul.....	56
5.8	Adaptação e classificação da severidade das classes do Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
6.1	Validação do banco de dados de Xavier et al. (2016) para a Estimativa da Evapotranspiração de Referência	60
6.2	Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer para o estado do Rio Grande do Sul	62
6.2.1	Análise da primeira aproximação do fator de Caracterização Climática (K).....	62
6.3	Modificação do Índice de Severidade de Palmer para o estado do Rio Grande do Sul	68
6.4	Análise do índice de severidade de seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul	79
6.4.1	Estimativas da Evapotranspiração de Referência (ET ₀).....	79
6.4.2	Análise de ocorrências de eventos de seca para o índice PDSI-RS	87
6.5	Adaptações das classes de seca para o estado do Rio Grande do Sul	103
7	CONCLUSÃO	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICES	122

Lista de Figuras

Figura 1- Evolução das secas meteorológica, agrícola, hidrológica e econômica, em função da duração e dos seus impactos.	29
Figura 2- Espacialização dos pontos que compreendem o estado do Rio Grande do Sul, segundo o banco de dados de Xavier et al. (2016).	41
Figura 3- Divisão do estado do Rio Grande do Sul em sete mesorregiões.	54
Figura 4- Pontos que compreendem a localidade de Pelotas/RS, segundo o banco de dados de Xavier et al. (2016) e a Estação Agroclimatológica de Pelotas.	60
Figura 5- Médias mensais da Evapotranspiração de Referência para Pelotas/RS, utilizando o método de Penman-Monteith (FAO).	61
Figura 6- Regressão linear simples da ET_0 mensal obtido pelo método de Penman-Monteith (FAO), com os dados observados e os dados dos pontos A, B e C do banco de Xavier et al. (2016), para a localidade de Pelotas/RS.	63
Figura 7-Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para a localidade de Pelotas/RS.	66
Figura 8- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para a localidade de Santa Vitória do Palmar/RS.	66
Figura 9- Índice de Umidade de Palmer e Z modificado para localidade de Porto Alegre.	66
Figura 10- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Vacaria/RS.	66
Figura 11- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Passo Fundo/RS.	67
Figura 12- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Santa Maria/RS.	67
Figura 13- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Alegrete/RS.	67
Figura 14- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Santa Rosa/RS.	67
Figura 15- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Alegrete, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).	80
Figura 16- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Bagé, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).	80

Figura 17- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Bom Jesus, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	80
Figura 18- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Bom Retiro do Sul, utilizando o método de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO).	81
Figura 19- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Cachoeira do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	81
Figura 20- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Caxias do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	81
Figura 21- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Cruz Alta, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	82
Figura 22- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Encruzilhada do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	82
Figura 23- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Ijuí, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	82
Figura 24- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Osório, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	83
Figura 25- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Pelotas, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	83
Figura 26- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Porto Alegre, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	83
Figura 27- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Restinga Seca, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	84
Figura 28- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Cruz do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	84
Figura 29- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Maria, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	84
Figura 30- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Rosa, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	85
Figura 31- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Vitória do Palmar, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	85
Figura 32- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santiago, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	85
Figura 33- Médias mensais da ET_0 para a localidade de São Gabriel, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	86

Figura 34– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Triunfo, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	86
Figura 35– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Vacaria, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).....	86
Figura 36- Índice PDSI-RS para a localidade de Alegrete/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	87
Figura 37- Índice PDSI-RS para a localidade de Bagé/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	88
Figura 38- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Jesus/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	88
Figura 39- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Retiro do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	88
Figura 40- Índice PDSI-RS para a localidade de Cachoeira do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	89
Figura 41- Índice PDSI-RS para a localidade de Caxias do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	89
Figura 42- Índice PDSI-RS para a localidade de Cruz Alta/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	89
Figura 43- Índice PDSI-RS para a localidade de Encruzilhada do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	90
Figura 44- Índice PDSI-RS para a localidade de Ijuí/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	90
Figura 45- Índice PDSI-RS para a localidade de Osório/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	90
Figura 46- Índice PDSI-RS para a localidade de Pelotas/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	91
Figura 47- Índice PDSI-RS para a localidade de Porto Alegre/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	91
Figura 48- Índice PDSI-RS para a localidade de Restinga Seca/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	91
Figura 49- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Cruz do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	92
Figura 50- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Maria/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	92

Figura 51- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Rosa/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	92
Figura 52 - Índice PDSI-RS para a localidade de Santiago/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	93
Figura 53- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Vitória do Palmar/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	93
Figura 54- Índice PDSI-RS para a localidade de São Gabriel, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	93
Figura 55- Índice PDSI-RS para a localidade de Triunfo/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	94
Figura 56- Índice PDSI-RS para a localidade de Vacaria/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	94
Figura 57- Índice PDSI-RS para a localidade de Alegrete/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	94
Figura 58- Índice PDSI-RS para a localidade de Bagé/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	95
Figura 59- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Jesus/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	95
Figura 60- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Retiro do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	95
Figura 61- Índice PDSI-RS para a localidade de Cachoeira do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	96
Figura 62- Índice PDSI-RS para a localidade de Caxias do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	96
Figura 63- Índice PDSI-RS para a localidade de Cruz Alta/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	96
Figura 64- Índice PDSI-RS para a localidade de Encuzilhada do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	97
Figura 65 -Índice PDSI-RS para a localidade de Ijuí/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	97

Figura 66- Índice PDSI-RS para a localidade de Osório/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	97
Figura 67- Índice PDSI-RS para a localidade de Pelotas/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	98
Figura 68 - Índice PDSI-RS para a localidade de Porto Alegre/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	98
Figura 69- Índice PDSI-RS para a localidade de Restinga Seca/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	98
Figura 70- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Cruz do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	99
Figura 71- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Maria/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	99
Figura 72- Índice PDSI-RS para a localidade Santa Rosa/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	99
Figura 73- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Vitoria do Palmar/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.	100
Figura 74- Índice PDSI-RS para a localidade de Santiago/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	100
Figura 75- Índice PDSI-RS para a localidade de São Gabriel/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	100
Figura 76- Índice PDSI-RS para a localidade de Triunfo/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	101
Figura 77- Índice PDSI-RS para a localidade de Vacaria/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.....	101
Figura 78- Regressão linear de todos os períodos de ocorrência de seca.	103
Figura 79- Regressões lineares para as ocorrências de seca para os períodos com valores médios, menos negativos e mais negativos	104
Figura 80- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Alegrete, Bagé, Bom Jesus, Bom Retiro do Sul, Cachoeira do Sul e Caxias do Sul.	109
Figura 81- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Cruz Alta, Encruzilhada, Ijuí, Osório, Pelotas, Porto Alegre, Restinga Seca e Santa Cruz do Sul.	110

Figura 82- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Santa Maria, Santa Rosa, Santa Vitória, Santiago, São Gabriel, Triunfo e Vacaria.111

Lista de Tabela

Tabela 1- Classificação do índice de desempenho (c), de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).....	42
Tabela 2- Valores arbitrários de t , X_i , X_{i-1} e ΔX , segundo Palmer (1965).....	50
Tabela 3- Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Severidade de Palmer (PDSI) (PALMER, 1965).....	52
Tabela 4- Caracterização das 8 estações meteorológicas localizadas em algumas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul.....	54
Tabela 5- Localidades e mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul	57
Tabela 6- Valores do coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e do índice de desempenho (c), resultantes da comparação estatística entre ET_0 estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO) com dados observados pela Estação Agroclimatológica de Pelotas e dados estimados por Xavier et al. (2016).....	61
Tabela 7- Fator de ponderação mensal ($D' * K''$) para as oito localidades base	64
Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948).....	69
Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948).....	70
Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948).....	71
Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948).....	72
Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948).....	73
Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	74

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	75
Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	76
Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	77
Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).....	78
Tabela 10- Valores de Z acumulados e duração dos períodos de ocorrências.....	105
Tabela 10- Valores de Z acumulados e duração dos períodos de ocorrências.....	106
Tabela 11- Valores do coeficiente de determinação (r^2) e Índice de Willmott (d) para três classes de seca, para algumas localidades nas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul	107
Tabela 11- Valores do coeficiente de determinação (r^2) e Índice de Willmott (d) para três classes de seca, para algumas localidades nas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul	108
Tabela 12- Classes do índice de severidade de seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul PDSI-RS	113

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade climática de uma região constitui uma característica marcante, em que o clima é determinado a partir de um período de observações do comportamento dos elementos climáticos. Fatores regionais como altitude, relevo, tipos de vegetação, solos, refletem na variabilidade espacial desses elementos climáticos. O Rio Grande do Sul é uma região de clima temperado úmido, com chuvas distribuídas ao longo do ano, e mesmo assim tem tido períodos/safras prejudicadas, com a ocorrência de eventos de seca.

As ocorrências desses eventos afetam as mais variadas atividades agrícolas e os ecossistemas naturais, ocasionando impactos nos diversos sistemas agrícolas e nas atividades industriais. Em comparação com outros fenômenos climáticos, a seca apresenta certa complexidade, devido à instabilidade de sua duração e a frequência de ocorrência de seus períodos (BLAIN e XAVIER, 2018).

Considerada um fenômeno natural, que se caracteriza pela redução da quantidade de precipitação associada aos elementos climáticos, a seca resulta de valores de precipitação abaixo da média, com impactos no déficit de água, no nível hidrológico, ecológico, agrícola e econômico. Como a sua frequência de ocorrência, duração e severidade são aleatórias e incertas, dificultam a sua estimativa, bem como os impactos causados pela falta de água, durante o período de ocorrência.

A ocorrência desse fenômeno pode atingir qualquer região e suas consequências são sentidas nas mais diversas áreas. A frequência dos eventos, com foco na sua severidade e duração, tem gerado impactos significativos com perdas principalmente associadas à agricultura, bem como em outros setores, incluindo a produção de energia, turismo, transporte, abastecimento urbano e meio ambiente (WILHITE et al., 2014).

A definição de seca depende de sua duração e dos impactos causados, sendo geralmente classificadas em meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. A meteorológica, primeira a ser percebida, é definida como sendo o resultado de um déficit de precipitação, ou seja, quando o valor de chuva acumulado em um período e em uma área encontra-se significativamente abaixo do valor climatologicamente esperado. A seca agrícola é decorrente da deficiência hídrica no solo e consequente estresse hídrico às plantas. A seca hidrológica está relacionada com a redução dos níveis de água em reservatórios, por um determinado período de tempo, podendo

ser em escala diária ou anual. A seca socioeconômica refere-se ao déficit de água com efeito sobre a falta de serviços, não sendo possível suprir as necessidades humanas e também ao gerenciamento dos recursos hídricos (VROCHIDOU et al., 2013).

A partir desta classificação vários indicadores têm sido utilizados para quantificar, padronizar e comparar a seca em base temporal e espacial, como por exemplo, o Índice de Moreno, o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), o Índice de Anomalia de Precipitação (RAI), o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), entre outros. Os índices de seca se fundamentam nas variáveis climatológicas e métodos estatísticos, visando determinar a intensidade, a duração e a frequência da sua ocorrência.

Palmer (1965) desenvolveu o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), classificado como agrícola, a partir de definições de períodos secos, como sendo um espaço de tempo, de ordem de meses ou anos de duração, no qual o suprimento de água é menor do que o climaticamente esperado ou apropriado. O PDSI considera que o total de precipitação exigida, para manter uma área sob condições econômicas estáveis, depende da média histórica dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses precedentes e do mês considerado.

Palmer desenvolveu este índice levando em consideração dados climáticos de nove localidades dos Estados Unidos, para que assim o índice pudesse ser usado mundialmente, estabelecendo uma equação padronizada, sendo classificado como fator de caracterização climática. No entanto, alguns autores questionam sobre o emprego deste índice por levar em consideração em seu equacionamento características climáticas de outra região que não as existentes, por exemplo, no Brasil.

Alley (1984) faz uma crítica ao índice por não produzir confiabilidade que permita, em nível nacional, a comparação de condições hídricas de diferentes regiões. É importante destacar que na aplicação do PDSI algumas questões ainda carecem de investigação, principalmente às relacionadas ao método de estimativa da evapotranspiração de referência, já que Palmer (1965) estabeleceu o referido índice baseado no método de Thornthwaite, bem como o valor da capacidade de água disponível fixado em 100 mm.

Aliado a estas questões metodológicas, há ainda a subjetividade na seleção dos períodos de seca, para a obtenção da equação de calibração do índice.

Deste modo, pesquisar a influência da seca na disponibilidade de recursos hídricos, analisando o PDSI e modificando-o para a região de interesse, levando em consideração os fatores climáticos da própria região de estudo, poderá gerar índices mais confiáveis. Em um país como o Brasil, em que a agricultura possui grande importância, é fundamental que se busque entender as respostas das culturas às condições climáticas, com foco no monitoramento dos seus efeitos, auxiliando no planejamento, medidas de combate à seca na região de estudo e na diminuição de seus impactos.

2 HIPÓTESE

É possível modificar o Índice de Severidade de Seca de Palmer e assim obter uma nova escala de classificação de severidade para o estado do Rio Grande do Sul, considerando as condições climáticas da região de estudo.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Avaliar e adaptar o Índice de Severidade de Seca de Palmer às condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul, estimando a evapotranspiração de referência pelos métodos de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO) e valores para a capacidade de água disponível do solo de 50, 75 e 100 mm.

3.2 Específicos

a) Verificar a concordância dos elementos climáticos do banco de dados de Xavier et al. (2016) com aqueles existentes na estação agroclimatológica de Pelotas/RS, para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (FAO).

b) Realizar uma primeira aproximação da modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer para oito localidades do Rio Grande Sul, considerando a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO) e capacidade de água disponível de 100 mm.

c) Calcular o Índice de Severidade de Seca de Palmer para diferentes estimativas de evapotranspiração referência pelos métodos de Thornthwaite (1948) e de Penman-Monteith (FAO) e para os diferentes valores de capacidades de água disponível no solo, 50, 75 e 100 mm, para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul.

d) Modificar o Índice de Severidade de Seca de Palmer, de acordo com as características climáticas da região de estudo.

e) Estabelecer, a partir da modificação proposta, as novas classes de seca de acordo com a sua severidade.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O Clima do Rio Grande do Sul

O clima de uma região é definido após um longo período de observação do comportamento dos elementos climáticos. O clima brasileiro apresenta uma grande variabilidade, oscilando do tropical no centro-Norte ao temperado no Sul, e de úmido na parte norte da região amazônica ao semi-árido, na maior parte da Região Nordeste, onde o bioma Caatinga prevalece (SENTELHAS, 2010).

A influência do clima ocorre sobre os ecossistemas, vegetação, formação das paisagens e na atividade econômica de uma região. Entre as variáveis climáticas, a precipitação, assim como a temperatura, são os elementos que atuam de maneira mais direta. A variabilidade da precipitação está relacionada com a dinâmica geral da atmosfera e com o relevo da região (GONÇALVEZ e BACK, 2018).

De acordo com Cera e Ferraz (2015), o Estado situa-se em uma região latitudinal favorável à atuação de diversos fenômenos meteorológicos, que afetam o tempo e o clima, como as frentes frias que atuam regularmente, favorecendo a distribuição espacial e temporal das chuvas.

O Rio Grande do Sul tem grande parte de sua economia associada ao agronegócio e às características do clima e suas variações podem determinar anos favoráveis ou desfavoráveis para a produção agrícola. Assim, a produção agropecuária tem o clima como principal fator responsável por quebras de safras e, conseqüentemente, diminuição de lucros (CERA e FERRAZ, 2015).

O Estado é uma região de clima temperado úmido, com chuvas distribuídas ao longo do ano, sendo a variabilidade climática uma característica importante, onde os fenômenos meteorológicos podem causar danos às atividades agrícolas, destacando-se a ocorrência de estação térmica fria, devido a atuação de massa de ar polar, sem uma estação chuvosa ou seca bem definida. De acordo com Nimer (1989) e Brito et al. (2008), os valores dos totais médios anuais da precipitação pluvial distribuem-se, de modo geral, de 1200 a 1900 mm.

Há ainda a influência das condições de relevo, latitude, altitude e continentalidade, sendo o relevo composto por serras, planaltos, depressões e vasta planície costeira. As temperaturas médias são mais elevadas no Litoral Norte, Depressão Central e Fronteira Oeste com a Argentina. Nas regiões de maior

altitude, como o Planalto Nordeste, predominam temperaturas mais baixas (FRITZSONS e MANTOVANI, 2015).

Ribeiro e Zavattini (2017) realizaram uma análise sazonal da distribuição das chuvas para o Rio Grande do Sul e constataram que o período de maior precipitação é do outono até o início da primavera, em função da maior atividade frontal pela intensificação das massas polares e tropicais no sul do País.

A precipitação pluvial média do Estado apresenta níveis suficientes para o desenvolvimento das principais culturas, entretanto, nos últimos anos vem sofrendo com um aumento dos eventos de seca, com períodos significativos de escassez hídrica.

Quanto à média anual de temperatura verifica-se que, em função da latitude e do relevo, no inverno as médias das temperaturas mínimas são inferiores a 10°C e no verão, as médias das máximas apresentam-se bastante elevadas, alcançando 32°C (BRITO et al., 2008).

Outro fenômeno natural que interfere no clima do Rio Grande do Sul é o El Niño, que indica uma elevação anormal na temperatura do oceano Pacífico Equatorial e, La Niña, que representa uma redução anormal de temperatura. O reflexo é uma alteração nas condições atmosféricas, nas mais diversas partes do globo terrestre, principalmente em função de alterações no regime das chuvas. Em anos de ocorrência de El Niño verifica-se um aumento dos índices pluviais e com a La Niña, uma redução nas precipitações, ocasionando períodos de seca (BERLATO et al., 2005; PORTO et al., 2005).

Segundo Soppa et al. (2011) há uma relação entre o clima na região Sul do Brasil e os fenômenos de El Niño e La Niña, como o aquecimento e conseqüente anomalia do sistema oceano-atmosfera. Observações têm evidenciado que esses fenômenos tem uma grande contribuição na modulação da circulação atmosférica e nas anomalias de precipitação e eventos de seca no Sul do Brasil.

Assim, as condições meteorológicas associadas a esses fenômenos influenciam diversos setores, principalmente a agricultura e a economia do Estado, entre outros. A avaliação dos efeitos do El Niño e La Niña sobre a influência destes fenômenos sobre a seca podem fornecer subsídios importantes na formulação de estratégias para minimizar os impactos negativos.

Analisando a seca ocorrida na safra de 2007/2008 no Estado e seus impactos diretos e indiretos na produção, Fochezatto et al. (2009) concluíram que os efeitos

refletiram na redução da produtividade e fabricação de produtos alimentares, e assim uma queda no Produto Interno Bruto gaúcho.

Nedel et al. (2010) com objetivo de realizar um levantamento das secas ocorridas no período de 2003 até 2009 no Estado, verificaram que nos referidos anos houve mais de mil eventos. Verificaram que no verão ocorre um aumento no número de eventos de seca e que nos anos de 2004 e 2005, houve um período de seca em função da reduzida precipitação, sugerindo que o mesmo pode estar associado às características dos fenômenos El Niño e La Niña.

4.2 Definição de Seca

A seca se caracteriza pelo déficit de precipitação de uma região, em um determinado período de tempo, em relação ao climatologicamente esperado. Não existe uma definição universal, pois pode variar conceitualmente a partir de diferentes percepções, e de acordo com sua duração, severidade e distribuição espacial.

Segundo Pires (2015), a seca é um fenômeno extremo de origem natural que conduz a uma redução da quantidade de água disponível nos reservatórios. Essa escassez pode, no entanto, também ser induzida pela atividade humana, em consequência da exploração de aquíferos, uso inadequado dos solos, entre outros fatores.

De acordo com Batista Júnior (2012), a seca não tem uma classificação universal, mas em função de algumas percepções, pode ser classificada em quatro tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica, dependendo dos estágios de evolução do fenômeno. Inicialmente, o déficit de precipitação dá origem a um determinado tipo de seca e na continuidade da ausência de chuvas, acarreta em prejuízos sobre outros setores, originando, assim, os demais tipos.

A seca meteorológica é caracterizada pela comparação entre a precipitação atual e a precipitação normal, ou média, de um longo período de tempo, ou seja, um déficit de precipitação em relação ao valor médio, de um determinado local. É considerada específica para uma região, visto que as condições atmosféricas que acarretam a falta de precipitação variam espacialmente sendo, portanto, considerada referência para a ocorrência dos demais tipos (LIMA, 2016).

A seca agrícola ocorre quando a diminuição da precipitação conduz a uma redução significativa da disponibilidade de água no solo, ou seja, quando os déficits de precipitação reduzem a disponibilidade de água em reservatórios, em termos do sistema radicular das culturas, resultando em considerável redução da produção agrícola, com diminuição na produtividade agrícola. É considerada como decorrente da meteorológica, pois influencia na evaporação, contribuindo para a redução da água no solo, associada ao desequilíbrio entre a água disponível e a necessidade hídrica das culturas, o que pode levar a perda de produção (FERNANDES et al., 2009).

A seca hidrológica se baseia na deficiência de água disponível nos rios, lagos e reservatórios, pois ocorrem alterações e mudanças no sistema hidrológico, não sendo capaz de suprir as necessidades hídricas de uma determinada região. A seca hidrológica, mesmo tendo o clima como principal gerador, ainda pode ter seu processo acelerado pelas práticas antrópicas, como o uso inadequado do solo, desmatamento, construção de barragens e, principalmente, o mau uso dos recursos hídricos, bem como o inadequado gerenciamento dos mesmos. Assim, nos períodos em que os níveis dos rios e reservatórios estejam abaixo dos normais, a umidade do solo é insuficiente para suprir a necessidade das plantas (CUNHA, 2008).

Geralmente a seca hidrológica ocorre em um período de tempo maior, comparativamente, às secas meteorológicas e agrícolas, uma vez que os componentes do sistema hidrológico, como a umidade do solo, vazões dos rios e níveis dos reservatórios e águas subterrâneas apresentam maior tempo de resposta, em relação à deficiência de precipitação (NDMC, 2016).

A seca socioeconômica ocorre quando as reservas de água disponíveis não conseguem suprir às necessidades humanas, podendo estar relacionada ao aumento populacional e nos usos dos recursos hídricos e, ainda, em última análise, como consequência dos demais tipos de seca.

Vários autores abordam os tipos de seca quanto a sua magnitude e suas percepções (CUNHA, 2008; ROSSATO et al., 2017; WANG et al., 2018), realizando pesquisas no sentido de caracterizar o fenômeno, com a intenção de quantificar, caracterizar, definir e prever, utilizando indicadores. Para tanto são utilizadas equações, com base em variáveis climáticas e procedimentos estatísticos capazes de determinar a intensidade, a duração e a frequência com que essa anomalia ocorre, assim identificando-a e caracterizando-a.

Os índices de seca são classificados de acordo com o seu grau de severidade e tempo de duração naquele período. No sentido de caracterizar o fenômeno da seca, vários indicadores têm sido desenvolvidos, sendo alguns com melhores resultados do que outros, para determinada região e clima (MOREIRA et al., 2010; SILVA, 2011; GOIS et al., 2015).

Dentre os índices utilizados têm-se o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), Índice de Anomalia de Umidade de Palmer (Z), Índice Padronizado de Precipitação (SPI), Índice de Moreno, Porcentagem Normal, Aridez, Hídrico, Anomalia de Chuva (RAI), entre outros (MCKEE et al., 1993; NERY et al., 2000; BLAIN e BRUNINI, 2007; BLAIN et al., 2010; MISHRA e SINGH, 2010; FERNANDES et al., 2010; FRANCISCO et al., 2015), os quais requerem diferentes variáveis de entrada e metodologias de cálculo.

Mishra e Singh (2010) avaliaram a importância do fenômeno da seca e o impacto das mudanças climáticas em estudos realizados na Ásia, África, Europa, América do Norte e Austrália, levando em consideração alguns parâmetros hidrológicos e climáticos. Os autores concluíram sobre a importância da mitigação da seca, a partir desses estudos relacionados aos índices de seca, a fim de amenizar o impacto da mesma.

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma adaptado de Cunha (2008), que permite visualizar a evolução dos diferentes tipos de seca, em função da duração e dos seus impactos, bem como a magnitude relacionada. Demonstra que os quatro tipos de seca não ocorrem ao mesmo tempo, mas estão envolvidos no processo.

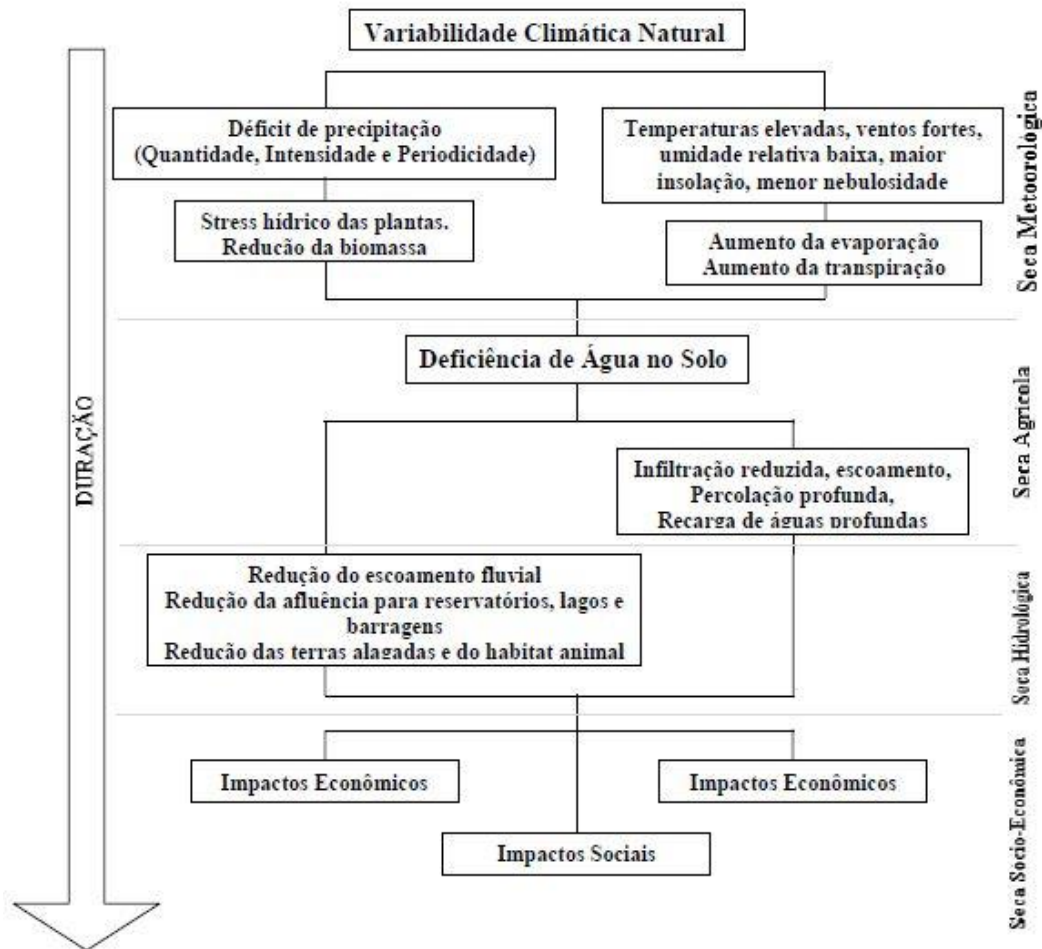


Figura 1- Evolução das secas meteorológica, agrícola, hidrológica e econômica, em função da duração e dos seus impactos.

Fonte: adaptado de Cunha (2008)

4.3 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O PDSI foi desenvolvido em 1965 por Palmer, a partir da definição de períodos secos, como sendo um espaço de tempo, da ordem de meses ou anos de duração, no qual o suprimento de água é menor do que o climaticamente esperado ou apropriado. Palmer desenvolveu este índice e aplicou nos Estados Unidos (EUA), em duas divisões climáticas (Central Iowa e Western Kansas), a partir de relações empíricas estabelecidas para o seu cálculo, utilizando um conjunto restrito de dados.

Este índice baseia-se no balanço hídrico do solo, utilizando dados da recarga do solo e perda de umidade na camada superficial do solo, cujos dados de entrada são os valores de precipitação (P), a evapotranspiração de referência (ET_0) e a capacidade de água disponível no solo (CAD), adotando valores de 100 mm. Para

tanto, são estabelecidos critérios para determinar quando um período seco ou úmido começa e termina, variando de -4,0 a +4,0, sendo o valor de PDSI igual a -4,0, classificado como seca extrema e -3,0, como severa.

O objetivo deste índice é fornecer medidas normalizadas das condições de umidade, de modo que comparações possam ser feitas entre localidades e entre meses diferentes, possibilitando a identificação e estimativa do seu grau de severidade, o que, teoricamente, permitiria comparações espaciais e temporais (PALMER, 1965).

Segundo o autor foi estabelecido um índice que satisfaz as necessidades hidrológicas e agrícolas, e que vem sendo usado com sucesso (BLAIN, 2005; CUNHA, 2008; SILVA, 2016; WANG et al., 2018). Em suas principais suposições, relacionadas ao cálculo dos componentes do balanço hídrico e à natureza empírica dos coeficientes de padronização, concluiu que o PDSI é uma ferramenta útil para a pesquisa e monitoramento de eventos de seca.

Silva (2016) analisou a relação do PDSI com a produtividade de café no Espírito Santo/ES e da soja nos estados do Mato Grosso/MT, Paraná/PR e Rio Grande do Sul/RS, no período de 1990 a 2013, utilizando os dados de produtividade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). De acordo com os resultados obtidos, utilizando regressão linear simples, o autor concluiu que o PDSI não foi significativo na correlação com a produtividade de café no ES, mas, para a cultura da soja, o PDSI foi significativo para o estado do RS e MT.

Fernandes et al. (2010) analisaram os índices de seca agrícola e meteorológica para Goiás, no período de 1983 a 2008, em que os resultados permitiram observar que o índice Z mostrou maior ocorrência de eventos de seca, em comparação ao PDSI. Esse índice estimou períodos com ocorrência de secas mais prolongadas, devido ao índice Z não levar em consideração, as condições hídricas de meses precedentes. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o índice Z obteve o melhor desempenho para a região analisada.

Martins et al. (2015) analisaram a variabilidade espacial e temporal da seca para as condições mediterrâneas de Portugal, no período de 1950-2003, comparando os índices PDSI e o modificado, utilizando a evapotranspiração real, denominado MedPDSI. Foi utilizada a análise de componentes principais para estabelecer os padrões espaciais, permitindo identificar duas sub-regiões, consistentes com as obtidas em estudos anteriores para o país, que são a noroeste

e a sul. Os autores verificaram que os eventos extremos foram menos frequentes no índice modificado, porém com maiores eventos de seca na primavera e úmidos no outono, para ambas as regiões.

Silveira (2016) com o objetivo de caracterizar o comportamento da seca agrícola e meteorológica, para algumas localidades do estado do Rio Grande do Sul, no período de 1961 a 2013, analisou o PDSI, o índice Z e o SPI. Os resultados mostraram que o índice PDSI apresentou maiores eventos de secas severas e extremas, em relação aos índices SPI e Z. O autor encontrou uma melhor aproximação do SPI em relação ao PDSI e considerou que devam ser realizados mais estudos de acordo com as condições climáticas da região.

De acordo com Martins et al. (2015), o PDSI vem sendo utilizado mundialmente, principalmente pelo Serviço Meteorológico dos Estados Unidos e Portugal para o monitoramento dos eventos de seca. Segundo os autores, as principais limitações do índice estão relacionadas com o balanço hídrico do solo, a calibração no cálculo do PDSI, e o fator de ponderação da caracterização climática, que dificulta a sua aplicabilidade e comparação em outras regiões, que não o país onde foi desenvolvido.

Dai (2011) faz uma reflexão sobre o índice PDSI no modelo original de Palmer, em função da utilização da equação de Thornthwaite (1948) para a estimativa da evapotranspiração de referência, pois poderia levar a erros em função da mesma ser baseada apenas nos valores da temperatura média. O autor sugere que o índice, nos locais de disponibilidade de dados, seja calculado utilizando a estimativa pela equação de Penman-Monteith, preconizada pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO).

Embora este índice seja usado mundialmente para estimar a severidade de uma seca, é questionado por levar em consideração na sua formulação, fatores climáticos dos EUA, onde Palmer utilizou dados de nove localidades do país para realizar uma padronização do índice, onde obteve o fator de caracterização climática, que seria aplicável em qualquer região. Nesse sentido é imprescindível estudos para a modificação desse fator, para as condições climáticas para a região de estudo.

4.4 Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

O BHC foi desenvolvido inicialmente com o objetivo de caracterizar o clima de uma região, de modo a ser empregado na classificação climática desenvolvida por Thornthwaite, na década de 40. Posteriormente, começou a ser empregado para fins agrônômicos, dada a grande inter-relação da agricultura com as condições climáticas.

Segundo Carvalho et al. (2011) através da estimativa do BHC é possível determinar os períodos de ocorrência de deficiência e excedente hídrico, retirada de água do solo e da quantidade de água armazenada no mesmo, através dos elementos climáticos mensais.

Thornthwaite e Mather (1955) desenvolveram o BHC como uma maneira de monitorar a variação do armazenamento de água no solo através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela precipitação (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração de referência (ET_0) e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD), apropriada ao estudo em questão. O BHC fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (CAMARGO e CAMARGO, 1993; PEREIRA et al., 1997).

Segundo Horikoshi e Fisch (2007), a disponibilidade hídrica pode ser quantificada pelo BHC, por períodos com valores excedentes e com deficiências, permitindo um planejamento para as atividades agrícolas, bem como a quantificação das lâminas a serem utilizadas na irrigação, caso o balanço hídrico seja para fins de irrigação. Sendo assim, para definir se uma região apresenta deficiência ou excesso de água durante o ano, é indispensável comparar dois elementos opostos do ciclo hidrológico: a precipitação que contribui para a umidade no solo e a evapotranspiração, que diminui a umidade do mesmo.

Além do BHC, é utilizado também o BH para fins de auxílio à tomada de decisão no uso da irrigação, considerada uma prática agrícola, cujo objetivo é atender as necessidades hídricas das culturas, evitando, assim, que estas sofram deficiências hídricas e, conseqüentemente, reduções em seus rendimentos.

O BHC considera o solo como um reservatório em que se verificam entradas e saídas de água. A variação do volume de água armazenada no reservatório é calculada combinando a precipitação, a evapotranspiração de referência e a capacidade de armazenamento de água no solo. O BH do solo ganhou especial importância na identificação da seca agrícola e no cálculo das necessidades de irrigação.

4.4.1 Capacidade de Água Disponível no Solo (CAD)

Castro et al. (2010) calcularam o BHC em escala mensal, utilizando o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), assumindo uma CAD máxima igual a 100 mm. A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948), pela disponibilidade dos dados climáticos e por ter sido desenvolvido para regiões de clima úmido, apresentando boas estimativas para as condições no estado do Espírito Santo. Nesse sentido, o BHC é uma ferramenta que pode ser utilizada, por exemplo, na identificação de locais favoráveis para determinado tipo de cultura e classificação climática.

Oliveira et al. (2016) calcularam o balanço hídrico mensal para as condições climáticas da cidade de Januária/MG, para o período de 2006 a 2015, sendo os cálculos de evapotranspiração de referência também realizados pelo método de Thornthwaite (1948), adotando uma CAD de 100 mm. A região apresentou um período de sete meses consecutivos de deficiência hídrica, distribuído nos meses de abril a novembro, sendo o mês de setembro o de maior deficiência; já o excedente hídrico foi distribuído em dois meses, dezembro e março.

Segundo Cardoso et al. (2003), ao realizar a simulação de um balanço hídrico para um período de 20 anos na região de Lages/SC, a partir de valores médios de precipitação e evapotranspiração, constataram, para as condições de CAD de 75 e 100 mm, que a possibilidade de ocorrência de déficits hídricos é muito baixa. Para valores de CAD de 50 mm, os autores encontraram que a probabilidade de não ocorrer déficit hídrico seria superior a 50%, na maioria dos decêndios do ano. Para a condição de CAD de 25 mm, a possibilidade de ocorrência de déficits hídricos foi alta, apresentando magnitudes expressivas, especialmente no verão, e que deva ser realizada, se necessário, o uso da irrigação.

Silva (2010) analisou o balanço hídrico sazonal para o período de 1977 a 2006 e os impactos dos sistemas meteorológicos no regime hídrico para o ano de 2006, utilizando CAD igual a 100 mm, para as 16 estações meteorológicas distribuídas no estado do Rio Grande do Sul. O autor observou que a distribuição sazonal da precipitação pluvial foi uniforme, e a distribuição espacial foi diferenciada com volumes pluviais inferiores na metade Norte e superiores na metade Sul. Ocorreram anomalias negativas na metade Norte do RS, onde apresentaram déficits hídricos nos trimestres de janeiro, fevereiro e março, abril, maio e junho e, para outubro novembro e dezembro.

4.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração pode ser definida como sendo a transferência de vapor d'água para a atmosfera, proveniente de superfícies com vegetação, incluindo contribuições que seriam a evaporação da umidade existente no substrato, solo ou água, juntamente com a transpiração resultante da atividade biológica das culturas (FREITAS et al., 2013). A evapotranspiração é a perda de água de uma superfície, com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade para a atmosfera. A evapotranspiração pode ser classificada como de referência, real, de cultura e de oásis.

A evapotranspiração de referência (ET_0) é caracterizada como a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, ou seja, área com extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar (IAF), de crescimento ativo na fase adulta (PEREIRA et al., 1997).

A evapotranspiração real (ETR) pode ser definida como a quantidade de água realmente utilizada por uma superfície vegetada, em crescimento ativo, com solo coberto, com ou sem restrição hídrica, ou seja, é a perda de água que a superfície vegetada está tendo naquele momento, independente do seu estágio vegetativo.

A estimativa da evapotranspiração de cultura (ET_c) constitui fator básico para quantificar o total de água necessário para a cultura durante o seu ciclo. As plantas, nos seus diferentes estádios de desenvolvimento, apresentam diferentes necessidades de água. O coeficiente da cultura (k_c) permite estimar as necessidades hídricas de uma cultura, sendo fundamental para o manejo da

irrigação, varia com o tipo de cultura e a sua fase de desenvolvimento, bem como com as condições climáticas e com os tratos culturais (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de oásis (ET_0) é a quantidade de água utilizada por uma pequena área vegetada, irrigada, contornada por uma extensa área seca, de onde provém energia por advecção (PEREIRA et al., 1997).

4.5.1 Evapotranspiração de Referência (ET_0)

A ET_0 pode ser obtida por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos, lisímetros e parcelas experimentais, geralmente utilizados em projetos de pesquisa, devido ao elevado custo metodológico. Os indiretos baseiam-se na aplicação de métodos matemáticos que utilizam dados meteorológicos (PEREIRA et al., 1997). De acordo com Borges Júnior et al. (2012), a ET_0 pode ser estimada utilizando os métodos, como os de Penman-Monteith (FAO), Thornthwaite, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Hargreaves e Samani e tanque Classe A.

Dentre as estimativas empíricas têm-se as equações de Thornthwaite (1948), que utiliza somente dados de temperatura do ar, a estimativa de Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Camargo, que necessitam de dados de temperatura e de radiação solar. Para os métodos da Radiação Solar e de Blaney-Criddle, além da temperatura e radiação solar também necessitam de medidas de vento, umidade do ar, insolação e fotoperíodo. O método do Tanque classe A utiliza a medida de evaporação de um tanque e faz ajustes em função das características de cobertura da superfície onde o tanque está instalado, da velocidade do vento e umidade relativa do ar. Já o método proposto por Penman-Monteith (FAO) é utilizado como padrão de comparação com os outros métodos por ser o mais preciso para estimar a ET_0 , leva em seu equacionamento dados a radiação solar, velocidade do vento, temperatura média do ar e umidade relativa do ar (ALLEN et al., 1998; Pilau et al 2012; Costa et al., 2017).

4.5.2 Evapotranspiração de Referência por Thornthwaite (1948)

Em 1948, Thornthwaite desenvolveu um método para estimativa da ET_0 como um elemento climatológico, sendo considerada igual “chuva ideal”, para que uma

região não apresente nem excesso nem deficiência hídrica durante o ano. O equacionamento desenvolvido por Thornthwaite foi baseado em bacias hidrográficas e em medidas realizadas em lisímetros, utilizando apenas a temperatura média do ar como variável de entrada.

Segundo Carvalho (2011), a ET_0 é caracterizada pela transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, podendo ser estimada por diversos métodos como tanque Classe A, Hargreaves, Blaney e Criddle, entre outros. A avaliação de cada termo da equação da ET_0 envolve o levantamento de dados observados, de acordo com a metodologia indireta adotada.

Para quantificação dessas variáveis utilizam-se modelos empíricos ou determinísticos com embasamento físico, com ou sem componentes aleatórios ou probabilísticos, podendo ser estimada usando dados de temperatura média, com base no método de Thornthwaite (1948), ou a equação de Penman modificado, método de Priestley-Taylor entre outros, considerados empíricos (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972).

Andrade Junior et al. (2017) com o objetivo de estimar a ET_0 por métodos que utilizam menor número de variáveis meteorológicas, como Thornthwaite, Priestley-Taylor, Hargreaves e Samani, e comparando-os com o método padrão, Penman-Monteith (FAO), para alguns municípios do estado do Piauí, constataram que a ET_0 média diária estimada por Thornthwaite foi superior a todos os demais métodos em todos os municípios avaliados. Houve diferença estatística da estimativa de ET_0 por Penman-Monteith (FAO), para os períodos seco e chuvoso, em que o método de Thornthwaite não apresentou desempenho satisfatório.

4.5.3 Evapotranspiração de Referência por Penman-Monteith (FAO)

A escolha de um método de estimativa da ET_0 depende de uma série de fatores, tais como a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada. Métodos complexos, como o de Penman-Monteith, que apesar de ser o preconizado pela FAO, como o método padrão de estimativa da ET_0 na escala diária, exige grande número de variáveis meteorológicas. Por isso tem aplicação limitada, somente sendo utilizado quando há disponibilidade de todos os dados

necessários, o que, na prática, só é possível em situações específicas, como em campos experimentais.

O método de Penman-Monteith (FAO) para a estimativa de evapotranspiração, segundo Allen et al. (1998), prediz com eficácia a ET_0 em diversas condições de umidade atmosférica, necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos. A alternativa, segundo os autores, é o uso de equações simplificadas que consideram a ET_0 um elemento meteorológico padrão, para emprego na agrometeorologia.

Cardoso e Justino (2014) utilizaram a equação de Penman-Monteith (FAO) para analisar a distribuição espacial dos componentes da ET_0 no Brasil. O objetivo foi estudar, para o período de 1980 a 2000 e simular para o futuro (2080-2100), as componentes da ET_0 , considerando as diferentes condições meteorológicas, resultantes de uma simulação climática regional, a partir de um modelo de interação clima-vegetação. Os autores observaram que as maiores variações na amplitude da ET_0 foram identificadas no semiárido nordestino e no extremo sul do Brasil.

4.6 Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer

Santos e Pereira (1999) realizaram uma tentativa de adaptar a metodologia proposta por Palmer (1965), às condições ambientais do estado de São Paulo, para identificar e classificar os períodos de seca. A adaptação foi feita a partir dos períodos mais secos da região em questão. Para tanto, foram identificados intervalos iguais ou maiores do que quatro meses contínuos, que apresentavam índices Z negativos. Os autores efetuaram a regressão linear entre a média da soma acumulada desses índices Z negativos, para esses intervalos, e seus respectivos números de meses de duração. A partir dos resultados obtidos foi possível estabelecer a equação final para a quantificação dos eventos de seca.

De acordo com estudos realizados, a Característica Climática (K) é um fator de ponderação, utilizado para a normalização dos desvios da precipitação das condições normais (d), permitindo que o PDSI possa ser comparável entre diferentes regiões e diferentes meses. Os autores Alley (1984), Blain (2005) e Martins et al. (2015) observaram que K é baseada em um número limitado de observações,

referente a 9 divisões climáticas nos EUA, e é fracamente justificável em termos físicos e estatísticos.

Blain e Brunini (2007) avaliaram o PDSI para a quantificação da seca agrícola também no estado de São Paulo, tanto em escala mensal como decenal. O estudo foi desenvolvido para as localidades de Campinas/SP e Tatuí/SP, nos anos de 1963/1964, 2000/2001 (anos secos) e 1982/1983 (anos úmidos). Os autores observaram que o PDSI decenal detectou, com um mês de antecedência, a ocorrência de condições de seca. Esse atraso na identificação pelo PDSI mensal está relacionado à demora ou ao tempo de recorrência do armazenamento de água no solo, ou seja, na resposta das alterações do sistema solo-planta-atmosfera.

Ainda para o mesmo Estado, Blain (2005) avaliou e adaptou a metodologia do PDSI às condições climáticas do estado de São Paulo, comparando valores dos parâmetros do Balanço Hídrico de treze localidades. O ajuste do PDSI teve como foco principal o fator de Caracterização Climática, K, e a própria equação final do índice, chegando no valor de ponderação para a região igual a 22,80. O autor concluiu que o novo índice modificado PDSI_adap é uma ferramenta consistente para o monitoramento, próximo ao tempo real, da seca na escala mensal.

Wells et al. (2004) propuseram um índice PDSI auto-calibrado (Sc-PDSI) para as divisões climáticas de Nebraska, Kansas, Colorado, Wyoming, Montana, Dakota do Norte e Dakota do Sul, para o período de 1948 a 2001. O Sc-PDSI busca padronizar a variabilidade em qualquer local, utilizando características do clima local e assim obter um melhor ajuste na equação de regressão linear. Essa modificação no Índice de Palmer melhorou a extrapolação espacial do PDSI, transformando-a em uma medida de seca mais adequada para a região de estudo.

Dai (2011) analisou os padrões espaciais e temporais de variabilidade da seca e suas tendências em uma escala global, nos períodos de 1900 a 2008, para Eurásia, Índia, Estados Unidos, Austrália, Europa, utilizando PDSI sob diferentes modelos, PDSI original e SC-PDSI, usando dois diferentes métodos para calcular a evapotranspiração de referência como entrada para o modelo de Penman-Monteith (FAO) e Thornthwaite. Constatou que o índice SC_PDSI estimado pela evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (FAO) adaptou-se melhor às condições do clima da região de estudo.

Wang et al. (2018) compararam três índices de seca SC-PDSI, índice de evapotranspiração de precipitação padronizado (SPEI) e o índice de precipitação

padronizada (SPI) para algumas localidades da China, com o objetivo de analisar a variabilidade a longo prazo, sob diferentes escalas temporais para condições de seca, no período de 1960 a 2010. Os autores concluíram que as relações entre cada índice, em diferentes escalas de tempo, mostraram altos coeficientes de correlação, sendo que o SPEI e o SPI se correlacionam bem para uma dada série temporal. Os dados de SC-PDSI foram bem correlacionados com o SPEI, provavelmente por utilizarem dados de ET_0 no seu equacionamento. Assim, o SC-PDSI pode ser considerado um índice que representa déficits hídricos em escala média de tempo, sugerindo que o mesmo tem capacidade limitada para descrever o efeito das secas, para períodos de nove a vinte meses. Os índices SPI e SPEI em escalas de tempo de doze a vinte e quatro meses mostraram uma alta frequência temporal para períodos úmidos e uma menor frequência e duração maior nos períodos de seca.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Classificação do Clima e da Região de Estudo

O Rio Grande do Sul se enquadra na zona fundamental temperada ou “C”, de acordo com a classificação de Köppen e no tipo fundamental “Cf” - clima subtropical ou virgiano, “Cfa”, cuja temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, e a do mês mais frio oscila entre 3 e 18°C e clima temperado “cfb” com temperatura média do mês mais frio menor que 18 °C e temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C (ALVARES et al., 2013). O clima da região apresenta um regime de chuvas uniforme ao longo do ano, sendo determinado basicamente pela passagem regular dos sistemas frontais. Nos meses de maio e setembro, os sistemas meteorológicos sinóticos que atuam na região, com maior frequência e intensidade, influenciam mais o regime de chuvas e ocasionam a queda nas temperaturas (CONRADO et al., 2014).

O Estado possui uma área territorial de 281.748,5 km² divididos em 497 municípios (IBGE, 2017).

5.2 Dados Meteorológicos

Foi utilizado o banco de dados de Xavier et al. (2016) para o estado do Rio Grande do Sul, obtido pelo método de interpolação pelo inverso da distância ponderada para 415 pontos, com o desenvolvimento de grides de alta resolução (0,25° x 0,25°) (Figura 2) de variáveis climáticas como precipitação, temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

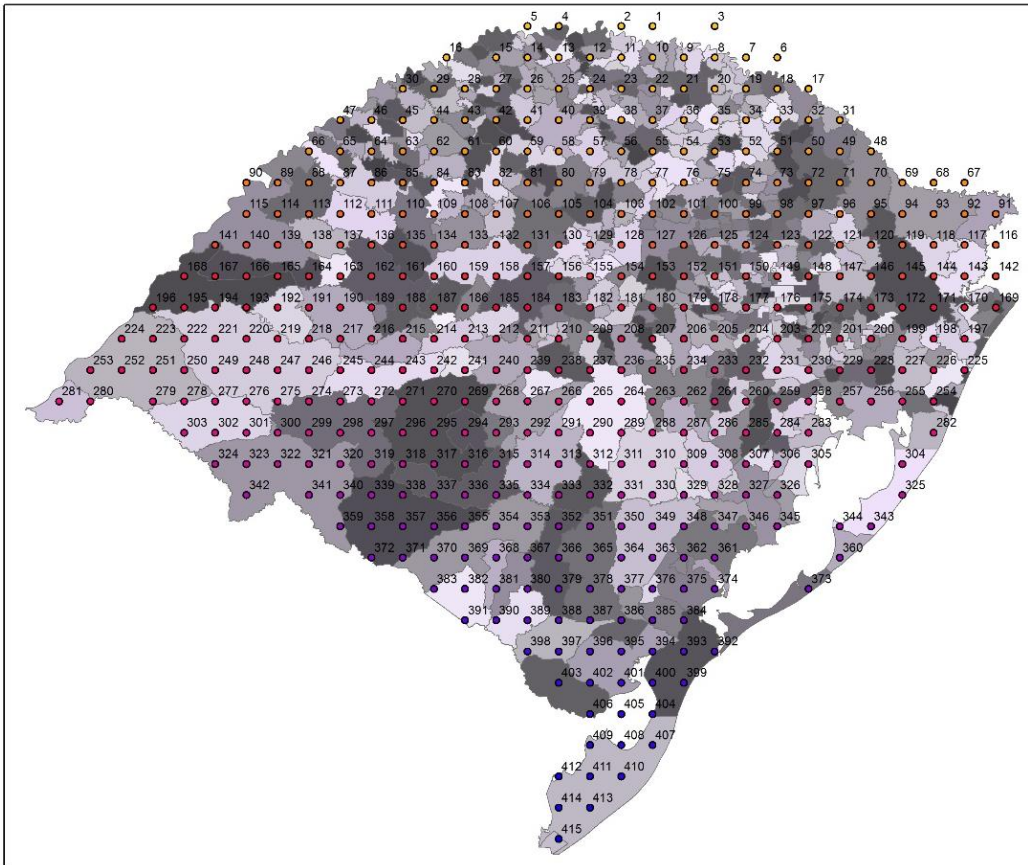


Figura 2- Espacialização dos pontos que compreendem o estado do Rio Grande do Sul, segundo o banco de dados de Xavier et al. (2016).

5.3 Validação de dados observados e dados simulados

Para validação do banco de dados de Xavier et al. (2016) foi utilizada a localidade de Pelotas/RS, uma vez que a mesma dispõe de todas as informações das variáveis de entrada para os modelos de estimativa da evapotranspiração. Foram obtidos dados de precipitação, temperatura média, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento da Estação Agroclimatológica de Pelotas, convênio Embrapa/UFPel/INMET, no período de 1980 a 2000.

Os dados meteorológicos foram confrontados com os três pontos disponibilizados por Xavier et al. (2016), de acordo com a localização na Figura 2, e calculados os desvios entre as variáveis observadas e estimadas. Assim, os resultados das evapotranspirações obtidas pelo banco e pela estação Agroclimatológica de Pelotas foram avaliados estatisticamente através do índice de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), o qual relaciona o coeficiente de correlação (r) e o índice de Willmott (d).

O índice de concordância de Willmott (d) é dado pela Equação 1, sendo que o resultado igual a 0 indica nenhuma concordância e 1, corresponde a concordância perfeita (WILLMOTT et al., 1985; CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

$$d = 1 \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (1)$$

em que,

P_i - valor estimado;

O_i - valor observado;

\bar{O} - média dos valores observados.

O índice de desempenho (c) é o resultado da multiplicação do coeficiente de correlação (r) e do índice de Willmott (d) (Equação 2) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997). O índice de desempenho foi avaliado segundo a Tabela 1.

$$c = r * d \quad (2)$$

Tabela 1- Classificação do índice de desempenho (c), de acordo com Camargo e Sentelhas (1997)

Índice de desempenho (c)	Classificação
$c > 0,85$	Ótimo
$0,76 \leq c \leq 0,85$	Muito Bom
$0,66 \leq c \leq 0,75$	Bom
$0,61 \leq c \leq 0,65$	Mediano
$0,51 \leq c \leq 0,60$	Sufrível
$0,41 \leq c \leq 0,50$	Mau
$c \leq 0,40$	Péssimo

5.4 Balanço Hídrico Climatológico (BHC)

O cálculo do BHC foi realizado de acordo com Thornthwaite e Mather (1955), utilizando duas metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência, sendo a de Thornthwaite (1948) e a de Penman-Monteith (FAO), com valores de capacidade de água disponível de 50, 75 e 100 mm, para o estado do Rio Grande do Sul.

5.4.1 Metodologia de Thornthwaite (1948)

O método de Thornthwaite (1948) foi aplicado considerando-se as Equações 3, 4, 5 e 6, sendo a temperatura média diária ($T_{\text{média}}$) obtida pela média entre os valores das temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$).

$$ET_0 = 16 \left(\frac{T_{\text{média}}}{I} \right)^a \quad \text{para } T_{\text{média}} > 0^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$T_{\text{média}} = \frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \quad (4)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (5)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_{\text{média}})^{1,514} \quad T_{\text{média}} > 0^\circ\text{C} \quad (6)$$

em que,

ET_0 – evapotranspiração de referência mensal (mm mês^{-1});

a – constante que depende do local;

I – índice de calor da região e que deve ser calculado com valores normais (média climatológica);

i – representa o mês do ano.

A equação de Thornthwaite estima a ET_0 para uma condição padrão de 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias. Para estimar a evapotranspiração de referência mensal (ET_0), para um mês de ND dias, e fotoperíodo médio mensal (N), há necessidade de ajustar a ET_0 (Equação 7).

$$ET_0 = ET_0 * \frac{N}{12} * \frac{ND}{30} \quad (7)$$

em que,

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}).

5.4.2 Metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Para a estimativa da ET_0 pelo método descrito por Penman-Monteith (FAO) foi utilizada a Equação 8.

$$ET_0 = \frac{0,408s(R_n - G) + \frac{\gamma * 900 * U_2 * (e_s - e_a)}{T + 275}}{s + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (8)$$

em que,

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

R_n - saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G - fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T - Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

U_2 - velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});

$(e_a - e_d)$ - déficit de pressão de saturação (kPa);

s - declividade de pressão de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ - constante psicrométrica ($0,063 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

As pressões de vapor, a declividade da curva de pressão de vapor e a declividade de pressão de saturação foram obtidas pelas Equações 9, 10 e 11, respectivamente.

$$e_s = 0,6108 * 10^{(7,5T/237,3+T+T)} \quad (9)$$

$$e_a = \left(\frac{e_s * UR}{100} \right) \quad (10)$$

$$s = \frac{0,4098 * e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (11)$$

5.5 Determinação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

O PDSI desenvolvido por Palmer (1965) baseia-se nos princípios do balanço entre o suprimento e a demanda de água no solo, sendo o solo dividido em duas camadas, uma superior (Ss) e outra sub-superficial (Su). Palmer utilizou o balanço hídrico para calcular os valores potenciais de recarga (PR), perda (PL) e o escoamento superficial (PRO) pelas Equações 12, 13, 14, 15 e 16, respectivamente.

$$PR = CAD - S \quad (12)$$

$$PL = PL_s + PL_u \quad (13)$$

$$PL_s = \text{Mínimo} [S_s'; ET_0] \quad (14)$$

$$PL_u = (ET_0 - PL_s) * \frac{Su'}{CAD} \quad (15)$$

$$PRO = CAD - PR = S' \quad (16)$$

em que,

PR - recarga potencial (mm mês⁻¹);

S' - água armazenada no início do mês em ambas as camadas (mm mês⁻¹);

CAD - capacidade de água disponível em ambas as camadas (mm mês⁻¹);

PL - perda potencial (mm mês⁻¹);

ET₀ - evapotranspiração de referência (mm mês⁻¹);

ETR - Evapotranspiração real (mm mês⁻¹);

PLs - perda potencial na camada superficial (mm mês⁻¹);

PLu - perda potencial na camada sub-superficial (mm mês⁻¹);

Ss' - água armazenada no início do mês na camada superficial (mm mês⁻¹);

Su' - água armazenada no início do mês na camada sub-superficial (mm mês⁻¹);

PRO - escoamento superficial potencial (mm mês⁻¹).

A recarga (R) no solo assume o valor do parâmetro alteração do armazenamento de água, quando este for positivo, considerando o valor zero para os demais valores. Enquanto a perda (L) assume o valor desse mesmo parâmetro, quando este for negativo.

O escoamento superficial (RO) só ocorre quando a capacidade de retenção de água do solo atingir seu ponto máximo (recarga potencial igual a zero), assumindo, portanto, o valor do excedente no balanço hídrico.

Para calcular os parâmetros “Climaticamente Apropriados às Condições Existentes (CAFEC)” foram considerados os seguintes coeficientes e seus valores médios (Equações 17, 18, 19 e 20), respectivamente.

Coeficiente de evapotranspiração:

$$\alpha = \frac{\overline{ETR}}{\overline{ET_0}} \quad (17)$$

Coeficiente de recarga:

$$\beta = \frac{\bar{R}}{PR} \quad (18)$$

Coeficiente de escoamento:

$$\gamma = \frac{\overline{RO}}{PRO} \quad (19)$$

Coeficiente de perda:

$$\delta = \frac{\bar{L}}{PL} \quad (20)$$

Esses coeficientes foram usados para calcular os valores CAFEC de evapotranspiração (\hat{ET}), de recarga (\hat{R}), de escoamento (\hat{RO}), de perda (\hat{L}) e de precipitação (\hat{P}) (Equações 21, 22, 23, 24 e 25), respectivamente.

$$\hat{ET} = \alpha \cdot ET_o \quad (21)$$

$$\hat{R} = \beta \cdot PR \quad (22)$$

$$\hat{RO} = \gamma \cdot PRO \quad (23)$$

$$\hat{L} = \delta \cdot PL \quad (24)$$

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L} \quad (25)$$

Após calcular a precipitação CAFEC (\hat{P}) foi determinada a anomalia hídrica (d'), que contabiliza o excesso ou deficiência, com relação à precipitação observada (P) (Equação 26):

$$d' = P - \hat{P} \quad (26)$$

Os valores de d' foram convertidos em polegadas para utilização pelo método de Palmer.

$$d'' = \frac{d'}{25,4} \quad (27)$$

Para que o índice seja comparável em diferentes localidades e em qualquer período, Palmer (1965) propôs um fator de Caracterização Climática (K), baseado em dados climáticos de nove regiões dos Estados Unidos e é dado pela Equação 28:

$$K = \frac{17,67 * K'}{\sum_1^{12} D'K'} \quad (28)$$

em que,

$$K' = 1,50 * \log_{10} \frac{\frac{\overline{ET_0} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2,80}{D} + 0,50 \quad (29)$$

em que,

D' - média mensal dos valores absolutos de d'' .

O produto entre o fator K e a anomalia hídrica resulta em um índice de anomalia de umidade (índice Z), padronizado temporalmente e espacialmente (Equação 30).

$$Z = d'' * K \quad (30)$$

Valores negativos de Z denotam períodos secos, enquanto valores positivos períodos úmidos. Após calcular o índice Z, Palmer escolheu treze períodos mais secos dessas séries históricas e realizou uma regressão linear simples entre o índice Z acumulado e o número de meses de ocorrência de tais períodos. No caso do presente trabalho foram selecionadas sequências de períodos secos maiores ou iguais a 10 eventos de seca, de forma a obter um coeficiente de determinação mais próximo possível de 1,0.

O parâmetro responsável pela especificação do grau de severidade de uma seca é o fator de duração (X). As equações de calibração que determinam o valor de X_i para cada mês foram deduzidas a partir dos intervalos mais secos nas diferentes localidades. Foram identificados os intervalos, iguais ou maiores do que um mês, que apresentaram valores do índice Z negativos (valores menores ou iguais a -1,5). Em seguida, foi realizada uma regressão linear entre a soma dos valores acumulados de Z nestes intervalos, e seu respectivo período de duração, obtendo-se uma equação da seguinte forma (Equação 31)

$$X_i = \frac{\sum Z(t)}{(a' * t + b')} \quad (31)$$

em que,

$\sum Z_i$ - índice Z acumulado no intervalo considerado;

t - número de meses no intervalo considerado;

a, b – coeficientes angular e linear, respectivamente.

Segundo Palmer, em meses sucessivos, uma certa deficiência hídrica é requerida meramente para manter uma mesma severidade de um período seco, pois uma seca extrema não persistirá nessa categoria, se os meses subsequentes forem normais ou próximos do normal. Para estabelecer os intervalos mensais de severidade de seca e, desta forma, definir a contribuição de cada mês para o valor do fator de duração, foi realizado $t = 1$ e $i = 1$ (Equação 32).

$$X_1 = \frac{Z_1}{(a' + b')} \quad (32)$$

A taxa na qual Z deverá aumentar, para ter uma variação de X constante, depende dos valores precedentes de X. Deste modo, é sugerido que para os meses posteriores ao mês do início de um período seco, deve ser adicionado um termo “c” à Equação 32, ficando:

$$\Delta X = \frac{Z_i}{(a' + b')} + c * X_i \quad (33)$$

em que,

$$\Delta X = X_i - X_{i-1} \quad (34)$$

A determinação da constante “c” foi feita com base na Equação 33, calculando-se o valor necessário de Z_i para manter um dado valor de X em meses subsequentes, isto é, $\Delta X = 0$. A Tabela 2 apresenta dois valores arbitrários de $X_{i-1} = X_i$ ocorridos em dois determinados meses t.

Tabela 2- Valores arbitrários de t, X_i , X_{i-1} e ΔX , segundo Palmer (1965)

t	X_i	X_{i-1}	ΔX
2	-1	-1	0
10	-1	-1	0
2	-3	-3	0
10	-3	-3	0

Substituindo na Equação 34 para os seguintes casos:

a) $X_{i-1} = X_i = -1$; $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$, tem-se

$$\sum Z_1 = -1 * (a' + b') \text{ e } \sum Z_2 = -1 * (a' * 2 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

b) $X_{i-1} = X_i = -1$; $t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$, tem-se

$$\sum Z_1 = -1 * (a' * 9 + b') \text{ e } \sum Z_2 = -1 * (a' * 10 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

c) $X_{i-1} = X_i = -3$; $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$, tem-se

$$\sum Z_1 = -3 * (a' + b') \text{ e } \sum Z_2 = -3 * (a' * 2 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

d) $X_{i-1} = X_i = -3$ $t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$, tem-se

$$\sum Z_1 = -3 * (a' * 9 + b') \text{ e } \sum Z_2 = -3 * (a' * 10 + b')$$

$$\Delta Z = \sum Z_1 - \sum Z_2$$

em que,

ΔZ - valor necessário para manter uma dada severidade de seca em meses subsequentes, ou seja, o decréscimo que o índice Z deve apresentar para que uma dada severidade ($X_{i-1} = X_i$) seja mantida.

Por fim, os valores de ΔZ foram aplicados na Equação 33 para determinar o valor de "c", resultando no cálculo do PDSI. A Tabela 3 apresenta as categorias de classificação do PDSI, considerando os períodos úmidos e secos. No presente trabalho, serão utilizadas apenas as classificações dos índices de intensidade

relacionados ao período seco, em função do objetivo do mesmo, por causarem maiores danos à produção agrícola.

Tabela 3- Classificação da intensidade da umidade e da seca, de acordo com o Índice de Severidade de Palmer (PDSI) (PALMER, 1965)

PDSI	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Umidade Alta
2,00 a 2,99	Umidade Moderada
1,00 a 1,99	Umidade Baixa
0,50 a 0,99	Umidade Inicial
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

5.6 Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

5.6.1 Primeira aproximação do fator de Caracterização Climática (K)

Segundo a metodologia original de Palmer (1965), as características climáticas de cada região são representadas pelo fator K. Deste modo, a adaptação do PDSI às condições do local de estudo tem como foco principal o ajuste do referido fator. Outros elementos como os parâmetros Climaticamente Apropriados às Condições Existentes (CAFEC) e o índice d' foram calculados como descritos na metodologia original.

Palmer considerou como primeira aproximação do fator K, uma relação entre a demanda média e o suprimento médio de água de uma região, sendo o fator de ponderação calculado por (k) (Equação 35).

$$k = (ETP + R)/(P + L) \quad (35)$$

Palmer (1965) fez um ajuste final nos valores de ponderação obtendo uma nova equação designada pela letra (K') (Equação 29), para obter o fator K das nove localidades dos EUA (Western Tennessee, West Central Ohio, Central Iowa, Scraton-P.A, Edwards Plateau-Texas, Southern Texas, Western Kansas, Texas High Plains e Northwestern North Dakota), no qual resultou em um valor de K igual a 17,67, para que fosse utilizado mundialmente (Equação 28).

Para uma primeira aproximação da modificação do PDSI foram utilizados dados de 8 localidades que compreendem o estado do Rio Grande do Sul, de acordo com cada mesorregião (Figura 3 e Tabela 4). Nesse sentido buscou-se verificar o comportamento do índice PDSI utilizando a estimativa da evapotranspiração de referência pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), também com capacidade de água disponível de 100 mm, comparativamente a proposta original de Palmer.



Figura 3- Divisão do estado do Rio Grande do Sul em sete mesorregiões.
Fonte: IBGE, 2016

Tabela 4- Caracterização das 8 estações meteorológicas localizadas em algumas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião	Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Centro Ocidental	Santa Maria	29°43'27"	53°43'12"	95
Metropolitana	Porto Alegre	30°03'13"	51°10'24"	47
Nordeste	Vacaria	28°31'00"	50°57'00"	1050
Noroeste	Santa Rosa	27°51'00"	54°25'00"	360
	Passo Fundo	28°13'33"	52°24'12"	684
Sudeste	Pelotas	31°45'00"	52°21'00"	13
	Santa Vitória do Palmar	33°31'57"	53°20'58"	24
Sudoeste	Alegrete	29°47'00"	55°46'00"	121

A modificação foi realizada no fator K, em que Palmer utilizou valores de (K') fator de padronização e valores de (D') média mensal dos valores absolutos para realizar a padronização do referido índice.

Foram gerados valores de (K') e (D') para as oito localidades, em que o somatório desses valores foi dividido pelo número de localidades base. Deste modo analisou-se o novo valor do fator de caracterização climática para o Estado, permitindo observar a diferença dos valores de K para a região de estudo e o valor encontrado por Palmer (1965).

Após esta primeira modificação, foi realizada uma nova ponderação para a região em estudo, com todos os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016), buscando-se encontrar uma nova equação de caracterização climática modificada, de acordo com os dados climáticos da região.

5.6.2 Modificação do Índice de Severidade de Palmer para as condições climáticas do Rio Grande do Sul

Foi realizada uma triagem dos 415 pontos disponibilizados pelo banco de dados de Xavier et al. (2016), obtendo-se 216 pontos correspondentes a cada localidade do Estado e após foram estimados os valores de evapotranspiração de referência pelos métodos de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO), considerando-se o cálculo do balanço hídrico climatológico para as capacidades de água disponível no solo de 50, 75 e 100 mm.

Após foi realizado o cálculo do PDSI obtendo-se os valores de (K') e (D'), conforme descrito na primeira aproximação do fator de caracterização climática, onde os valores gerados foram divididos pelo mesmo número de localidades analisadas.

Assim, foi obtida uma nova ponderação para a região em estudo e uma nova equação de caracterização climática (K), para as duas metodologias de evapotranspiração de referência e os valores de 50, 75, 100 mm para a capacidade de água disponível.

5.7 Análise das séries temporais para o Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o estado do Rio Grande do Sul

Para avaliar o comportamento do índice de severidade de seca de Palmer modificado para o Estado, pelas metodologias de Thornthwaite (1948) e de Penman-Monteith (FAO), para os valores de capacidade de água disponível de 50, 75 e 100 mm foram utilizadas 3 localidades de cada mesorregião do RS (IBGE, 2016) (Figura 3).

Na Tabela 5 estão descritas as características das 21 localidades, pertencentes às sete mesorregiões do Estado, para as quais foi realizada a calibração do índice PDSI modificado. Foi realizada análise de regressão linear simples, onde são selecionados os períodos mais secos do índice de umidade (Z) e o número de meses de ocorrência de tais períodos, e assim obter o índice PDSI-RS.

5.8 Adaptação e classificação da severidade das classes do Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul

Para determinar o período de início de uma seca e as ocorrências de tais eventos, Palmer (1965) escolheu treze períodos mais secos para as localidades de Central Iowa e Western Kansas, e a partir destas séries e por meio de uma regressão linear simples entre o Índice Z acumulado e o número de meses de ocorrência de tais períodos, chegou a expressão final de seu índice (Equação 36).

$$PDSI = \frac{Z_i}{3} + 0,897 * X_{i-1} \quad (36)$$

em que,

X_i - valor do índice de Palmer do mês questão;

X_{i-1} - valor do índice de Palmer do mês precedente.

Tabela 5- Localidades e mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião	Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Centro Ocidental	Santa Maria	29°43'27"	53°43'12"	95
	Restinga Seca	29°48'48"	53°22'30"	49
	Santiago	29°11'00"	54°52'00"	426
Centro Oriental	Santa Cruz do Sul	29°43'00"	56°26'00"	53
	Cachoeira do Sul	30°02'00"	52°53'00"	73
	Bom Retiro do Sul	29°36'32"	51°56'35"	35
Metropolitana	Osório	29°53'00"	56°16'00"	10
	Porto Alegre	30°03'13"	51°10'24"	47
	Triunfo	29°56'34"	51°43'04"	31
Nordeste	Caxias do Sul	29°11'39"	51°11'09"	760
	Vacaria	28°31'00"	50°57'00"	1050
	Bom Jesus	28°40'07"	50°26'31"	1048
Noroeste	Cruz Alta	28°37'28"	53°36'12"	432
	Ijuí	28°23'17"	53°54'50"	448
	Santa Rosa	27°51'00"	54°25'00"	360
Sudeste	Pelotas	31°45'00"	52°21'00"	13
	Santa Vitória do Palmar	33°31'57"	53°20'58"	24
	Encruzilhada do Sul	30°32'37"	52°31'25"	428
Sudoeste	Alegrete	29°47'00"	55°46'00"	121
	Bagé	31°18'17"	54°07'11"	230
	São Gabriel	30°20'27"	54°19'01"	109

Foi utilizado o mesmo método de Palmer para chegar a Equação 36, utilizando-se dez períodos ou mais que apresentaram ocorrências de seca severas no Estado. Esses períodos foram comparados com eventos de La Niña que ocorreram nos referidos anos (1985, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2011 e 2012), cujas localidades avaliadas estão descritas na Tabela 5. Assim realizou-se uma regressão linear simples de todos os períodos de ocorrências de seca e o índice de umidade (Z), de forma a encontrar o valor da expressão final do índice para as

localidades analisadas, e verificar se os períodos selecionados possuem alguma coerência entre si.

Com objetivo de tornar o índice PDSI modificado uma ferramenta para o monitoramento dos eventos de seca no Estado, foram testados os valores de -0,5, -1 e -1,5, como valores de início de uma seca. Palmer (1965) e Blain (2005) testaram os valores de -1,0 e -0,5, respectivamente, a fim de verificar qual se adaptaria melhor para a classificação. Deste modo foi testado também o valor de -1,5, como limite entre o fim e o início de uma seca. Quando o valor do índice for inferior a esse limite, foi detectada a ocorrência de seca.

A coerência desses limites (-0,5, -1,0 e -1,5) foi avaliada pela Equação 36, obtida com os valores das localidades modificadas para PDSI-RS, em que:

PDSI-RS= -0,5

PDSI-RS= -1

PDSI-RS= -1,5

$$Z_{\text{esp}} = D_{\text{esp}} * K \quad (37)$$

em que,

Z_{esp} - é o valor que o índice Z de anomalia hídrica deveria apresentar nos meses seguintes a esta detecção, para que o PDSI-RS voltasse a indicar condição hídrica estável.

D_{esp} = é o valor que d' deveria alcançar para que este fato acontecesse.

Deste modo estimou-se qual valor de precipitação deveria ter ocorrido para as determinadas situações esperadas.

$$P_{\text{esp}} = \frac{Z_{\text{esp}}}{K} + \hat{P} \quad (38)$$

em que,

P_{esp} - valor de precipitação que deveria ter ocorrido para que o índice não indicasse condições de seca, para os limites de -0,5, -1 e -1,5.

Foram testados os referidos valores a fim de verificar qual deles é mais coerente com as condições climáticas, assim a Precipitação esperada (P_{esp}), resultante pode ser considerada como o valor de precipitação, que traz as condições hídricas de um local ao climatologicamente esperado (BLAIN e BRUNINI, 2007).

Na sequência foram realizadas comparações entre a relação da evapotranspiração real (ETR) e da evapotranspiração de referência (ET_0), para os períodos com maiores eventos de seca, bem como as ocorrências de seca observadas na análise das séries temporais, e os anos que apresentaram fortes ocorrências de seca no Estado, comparados com os eventos de La Niña.

Os resultados obtidos dessa relação foram comparados pelo coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância de Willmott (d) (Equação 1), a fim de verificar qual dos valores (-0,5, -1,0 ou -1,5) detectam o início da seca para o Estado, para uma nova classificação da severidade das mesmas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Validação do banco de dados de Xavier et al. (2016) para a Estimativa da Evapotranspiração de Referência

Na Figura 4 estão os pontos espacializados do banco de dados de Xavier et al. (2016) para a localidade de Pelotas/RS (362, 374, 375), denominados de A, B e C, e o ponto que representa a estação Agroclimatológica de Pelotas utilizada para validação.

Na Figura 5 são apresentados os resultados obtidos pelas estimativas médias mensais da ET_0 a partir dos pontos A, B e C e pelos dados observados pela estação convênio Embrapa/UFPEL/INMET, utilizando a metodologia de Penman-Monteith (FAO), compreendendo o período de 1980 a 2000.

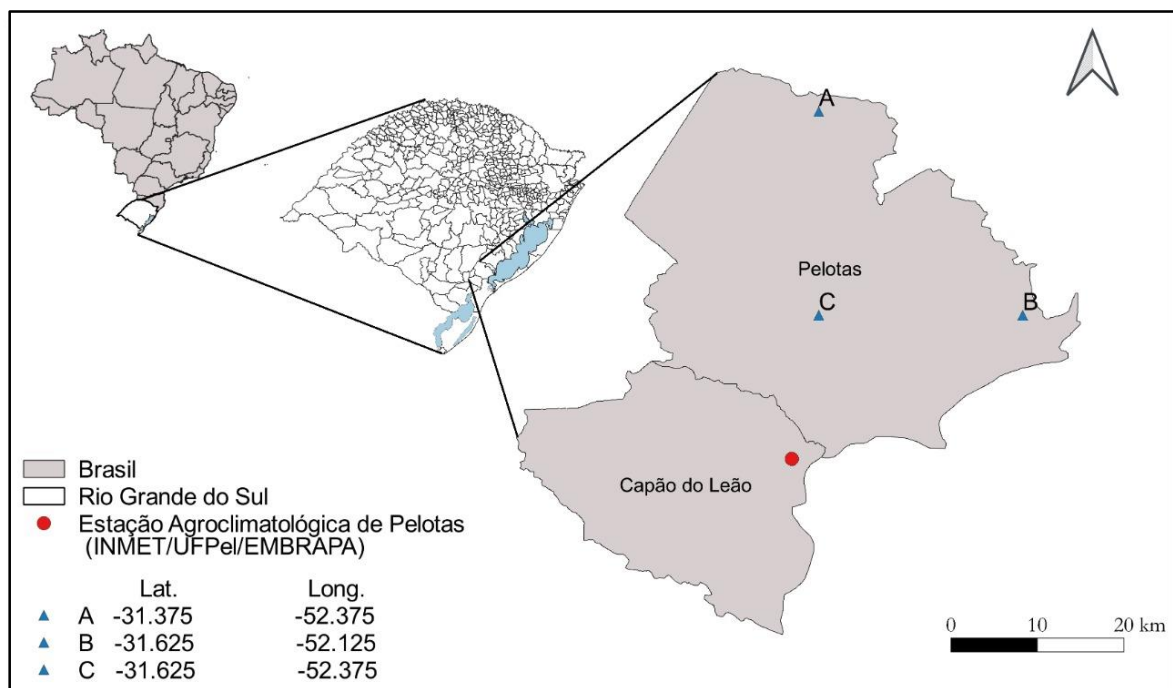


Figura 4- Pontos que compreendem a localidade de Pelotas/RS, segundo o banco de dados de Xavier et al. (2016) e a Estação Agroclimatológica de Pelotas.

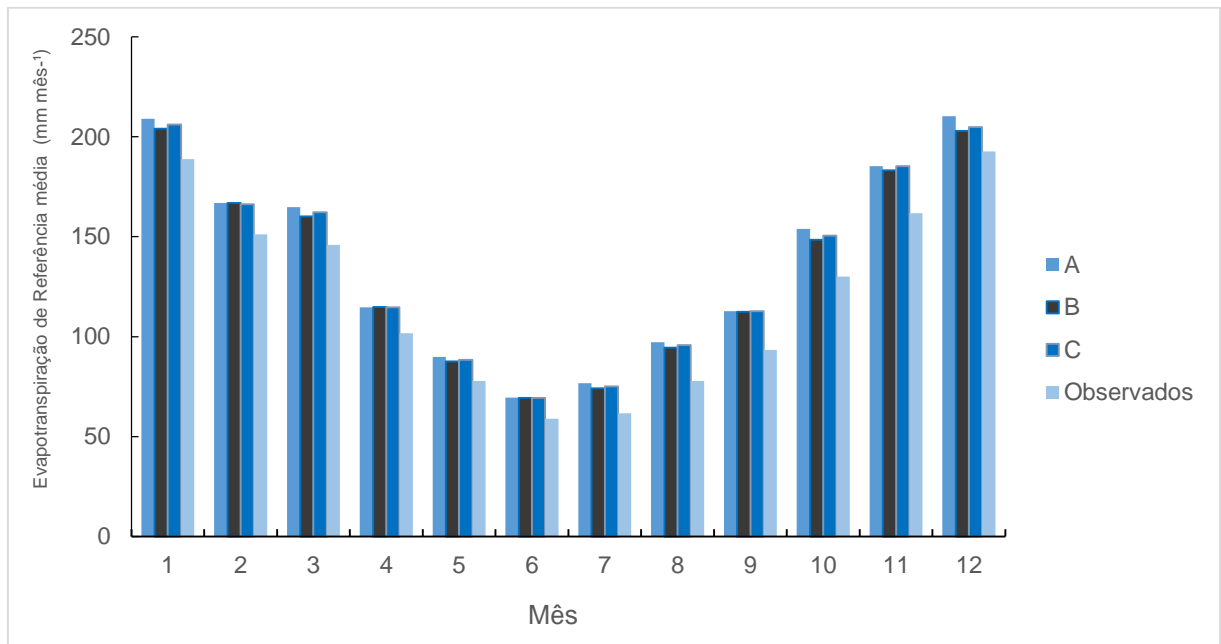


Figura 5- Médias mensais da Evapotranspiração de Referência para Pelotas/RS, utilizando o método de Penman-Monteith (FAO).

Analisando-se a Figura 5 observa-se que os valores mensais de ET_0 estimados mostraram-se similares entre si, mas superiores aos valores observados.

Na Tabela 6 observam-se os valores da correlação (r), índice de concordância (d) e do índice de desempenho (c) obtidos pela comparação dos dados observados e os valores estimados pelos dados nos pontos A, B e C, para a ET_0 , obtida pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).

Tabela 6- Valores do coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e do índice de desempenho (c), resultantes da comparação estatística entre ET_0 estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO) com dados observados pela Estação Agroclimatológica de Pelotas e dados estimados por Xavier et al. (2016)

Ponto	r	d	c
A	0,97	0,96	0,93
B	0,97	0,96	0,92
C	0,97	0,95	0,92

De acordo com a classificação de Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 1), os pontos A, B e C alcançaram um ótimo desempenho, em que todos os valores do índice de desempenho (c) foram superiores a 0,85, bem como para o coeficiente de correlação (r) e índice Willmott (d).

Na Figura 6 são apresentadas as regressões lineares entre os dados observados e estimados pela metodologia de Penman-Monteith (FAO). Observa-se que os valores de coeficientes de determinação (r^2) foram superiores a 0,90, para os pontos A, B e C em escala mensal, o que denota um excelente ajuste entre os dados estimados e os dados simulados.

Considerando-se os resultados de comportamento da ET_0 , os índices estatísticos e os valores de coeficiente de determinação obtidos para a localidade de Pelotas/RS, pode-se considerar que os dados dos elementos meteorológicos disponibilizados pelo banco de Xavier et al. (2016) podem ser expandidos para todo o Estado.

Veber et al. (2019) analisaram a consistência dos dados de precipitação disponibilizados por Xavier et al. (2016), em relação aos dados observados pela Estação Agroclimatológica de Pelotas/RS, no período de 2006 a 2013. Os autores realizaram uma análise estatística utilizando os coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2) e o método da curva dupla massa e constataram que os dados interpolados por Xavier et al. (2016) apresentaram uma boa correlação com os dados observados. A análise por meio da curva dupla massa permitiu verificar que os dados interpolados são consistentes em relação aos dados observados de precipitação, com r^2 igual a 0,99, concluindo que os dados interpolados podem ser utilizados em estudos hidrológicos no município de Pelotas/RS.

6.2 Modificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer para o estado do Rio Grande do Sul

6.2.1 Análise da primeira aproximação do fator de Caracterização Climática (K)

Como primeira análise do processo de modificação do PDSI para o Estado foram utilizadas as oito localidades descritas na Tabela 4, para a estimativa da ET_0 pelo método de Penman-Monteith (FAO) e Balanço Hídrico Climatológico, adotando uma CAD de 100 mm.

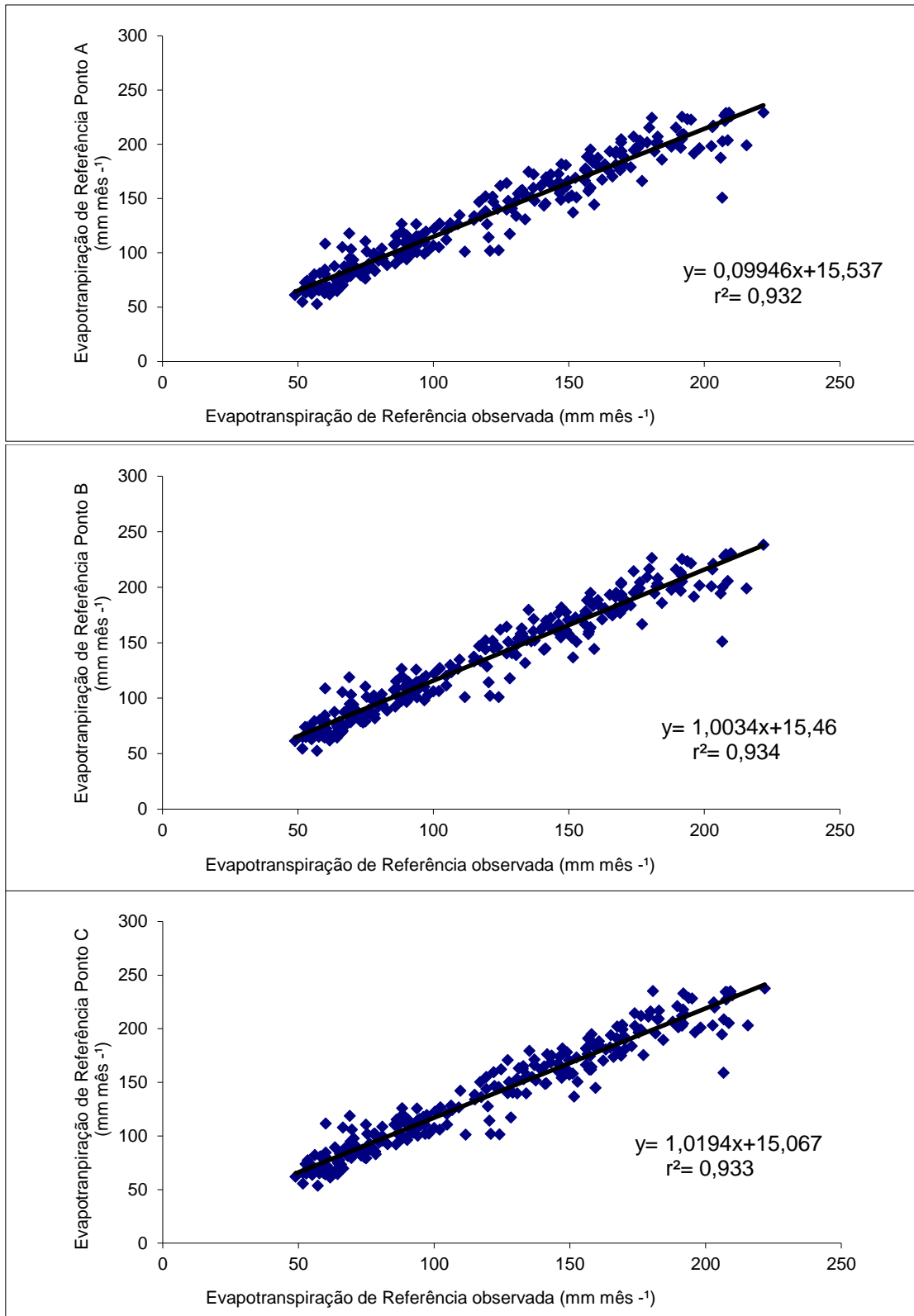


Figura 6- Regressão linear simples da ET_0 mensal obtido pelo método de Penman-Monteith (FAO), com os dados observados e os dados dos pontos A, B e C do banco de Xavier et al. (2016), para a localidade de Pelotas/RS.

A modificação foi no fator de caracterização climática (K), em que Palmer utilizou valores de (K') fator de padronização e valores de (D') média mensal dos valores absolutos de (d) para realizar a modificação.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados do somatório dos valores de (D') e (K'), sendo o valor do somatório total de 186,42.

Tabela 7- Fator de ponderação mensal (D' * K") para as oito localidades base

Mês	Pelotas	Santa Vitória	Porto Alegre	Vacaria	Passo Fundo	Santa Maria	Alegrete	Santa Rosa
Jan	2,03	2,13	2,03	1,83	1,88	1,96	2,03	1,93
Fev	1,96	1,99	2,14	1,95	2,03	2,03	2,03	2,05
Mar	2,00	2,10	2,15	2,06	2,03	2,04	1,98	2,02
Abr	1,83	1,81	1,83	1,80	1,80	1,76	1,80	1,78
Mai	1,78	1,76	1,78	1,82	1,82	1,80	1,84	1,84
Jun	1,73	1,73	1,67	1,71	1,72	1,72	1,75	1,74
Jul	1,85	1,86	1,82	1,83	1,85	1,84	1,87	1,88
Ago	1,90	1,85	1,87	1,91	1,92	1,91	2,06	1,96
Set	1,78	1,89	1,83	1,79	1,79	1,81	1,83	1,80
Out	1,85	1,93	1,83	1,75	1,74	1,78	1,76	1,72
Nov	2,24	2,33	2,26	2,10	2,12	2,22	2,17	2,15
Dez	2,41	2,56	2,38	2,14	2,21	2,40	2,43	2,19
Total	23,41	23,95	23,59	22,70	22,90	23,28	23,54	23,07

Após o somatório foi realizada a ponderação do fator climático, a partir da média das 8 localidades, resultando em um valor de 23,30, obtendo-se uma nova equação de Caracterização Climática (K) para o estado do RS (Equação 39).

$$K = \frac{23,30 * K'}{\sum_1^{12} DK'} \quad (39)$$

O valor padronizado encontrado por Palmer (1965) foi de 17,67 para os Estados Unidos, já para o estado do Rio Grande do Sul o valor encontrado foi 32% maior (23,30), o que está relacionado às diferenças entre o clima das regiões

estudadas por Palmer e o clima do Estado. Nesse sentido, Palmer (1965) descreve sobre o clima das regiões ponderadas, onde a localidade de Kansas tem os invernos frios e os verões bastante quentes, e para o clima do centro de Iowa pode ser classificado como subúmido, sendo os invernos mais frios, com temperaturas negativas (-20°C), comparativamente aqueles no oeste do Kansas, com verões não tão quentes.

Já no estado do Rio Grande do Sul, as quatro estações do ano são bem definidas, destacando-se também os eventos dos fenômenos El Niño e La Niña. Além disso, a interferência de fatores como relevo, características do solo, distribuição da precipitação, entre outros (NEDEL et al., 2010; 2012)

Mishra e Singh (2010) analisaram os eventos de seca a fim de mitigar e analisar o impacto das mesmas em todo o mundo nas últimas décadas. Observaram que as regiões dos Estados Unidos sofreram com grandes períodos de seca e que esses eventos estão associados ao clima da região, com períodos de intenso calor, com altas temperaturas e, conseqüentemente, precipitações abaixo da média esperada. Do mesmo modo, os autores relatam sobre a sensibilidade do índice PDSI quanto a precipitação e a temperatura.

Nas Figuras 7 a 14 estão os valores do índice de umidade (Z) de Palmer para a metodologia proposta por Palmer e para o índice de umidade (Z) modificado para cada uma das oito localidades base, utilizadas nesta primeira aproximação, considerando o período de 1980 a 2013.

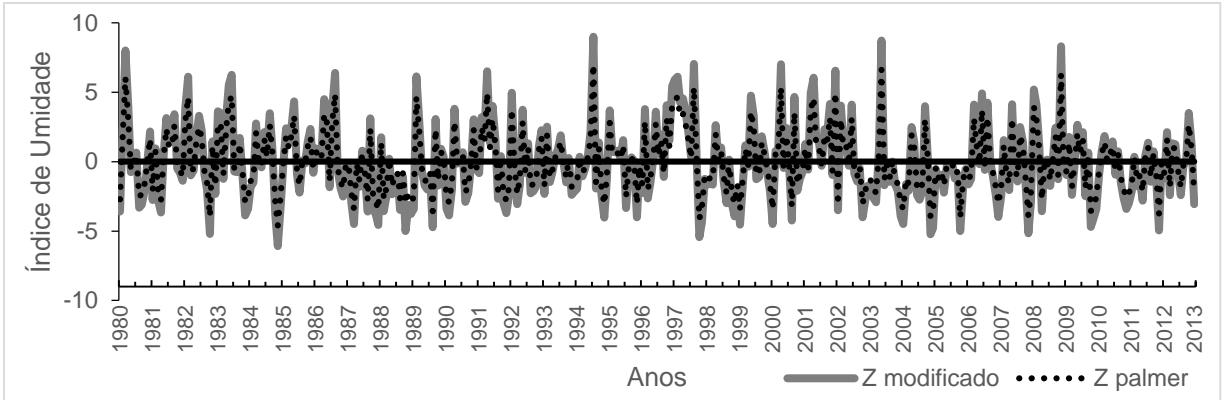


Figura 7-Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para a localidade de Pelotas/RS.

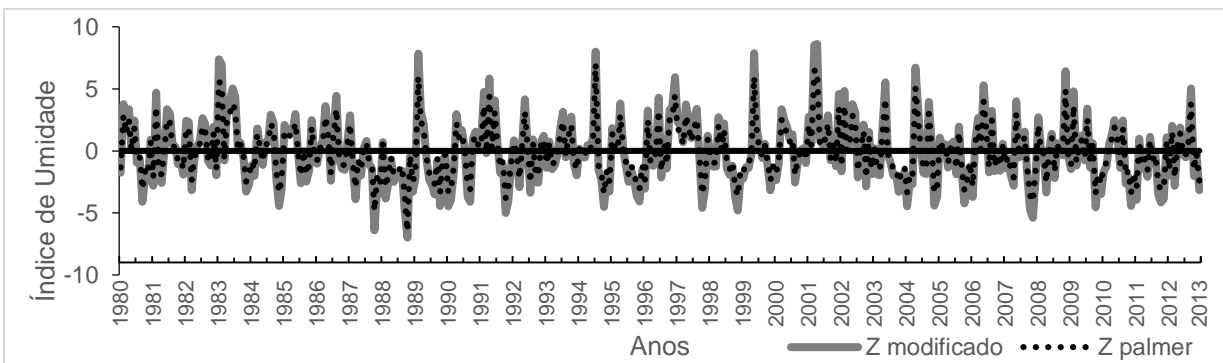


Figura 8- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para a localidade de Santa Vitória do Palmar/RS.

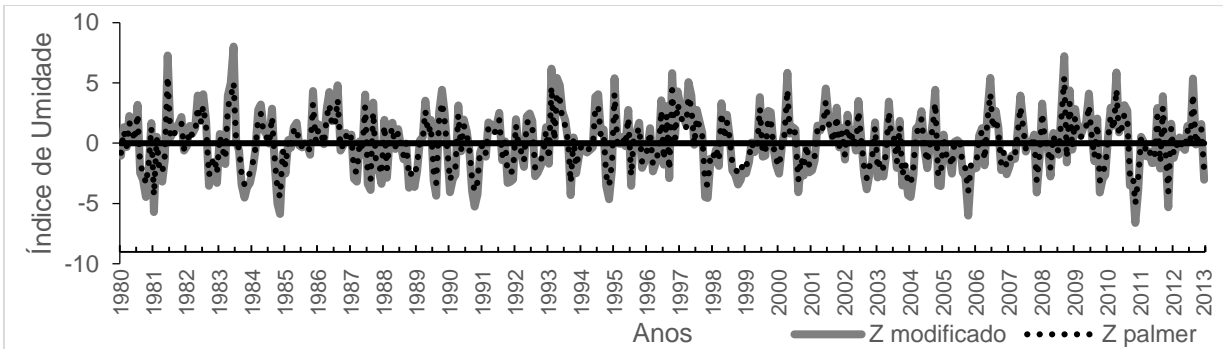


Figura 9- Índice de Umidade de Palmer e Z modificado para localidade de Porto Alegre/RS

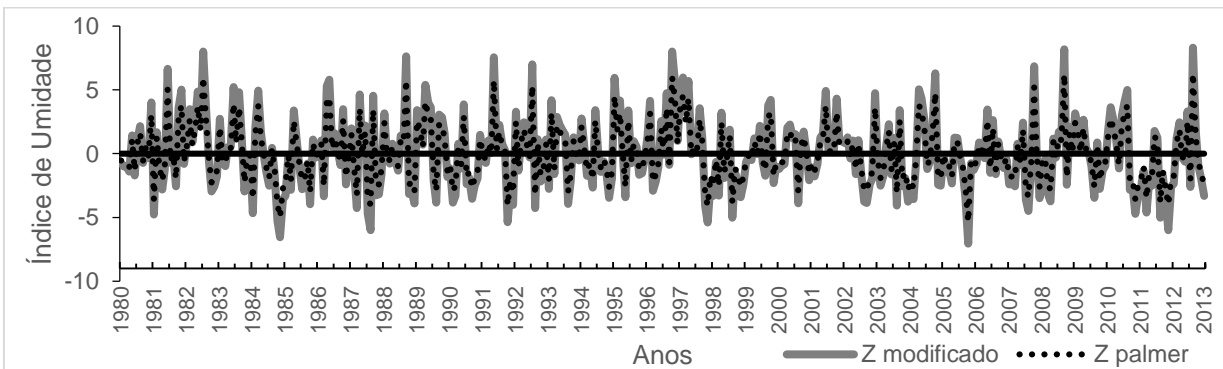


Figura 10- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Vacaria/RS.

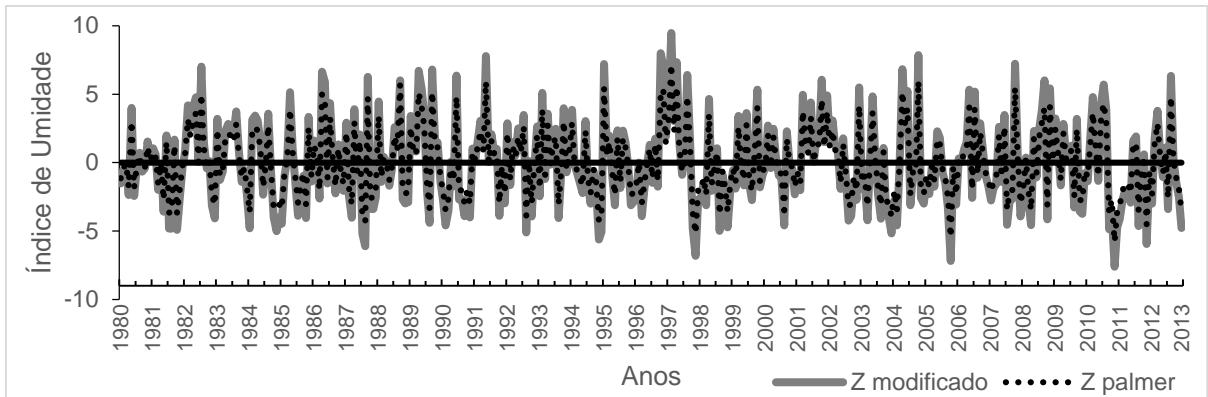


Figura 11- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Passo Fundo/RS.

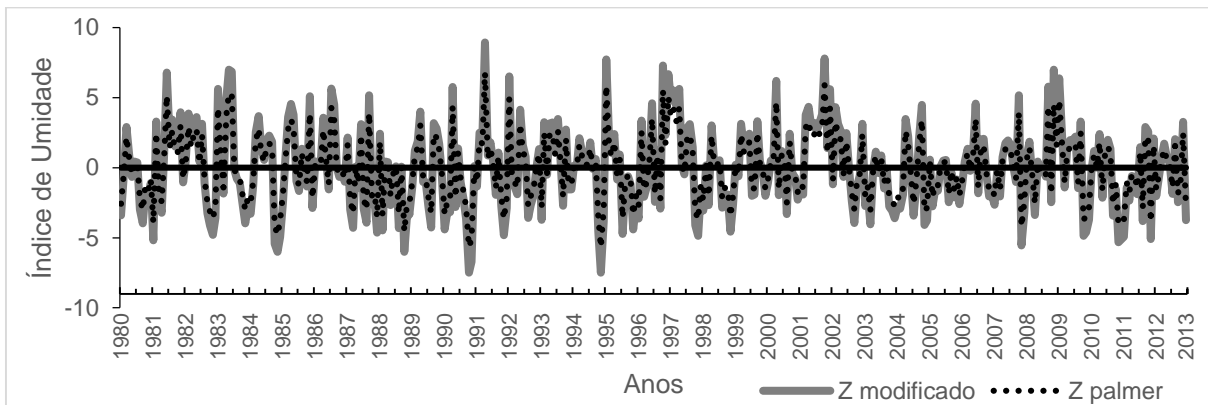


Figura 12- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Santa Maria/RS.

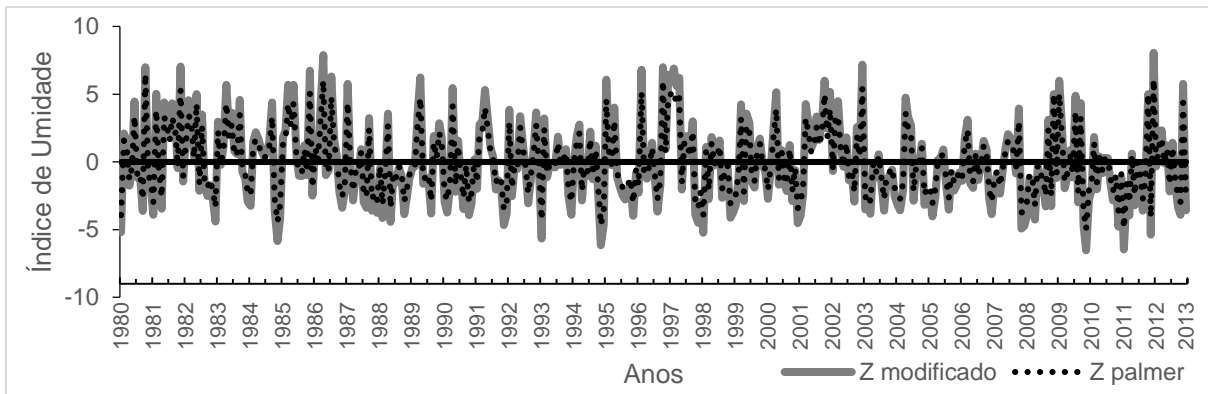


Figura 13- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Alegrete/RS.

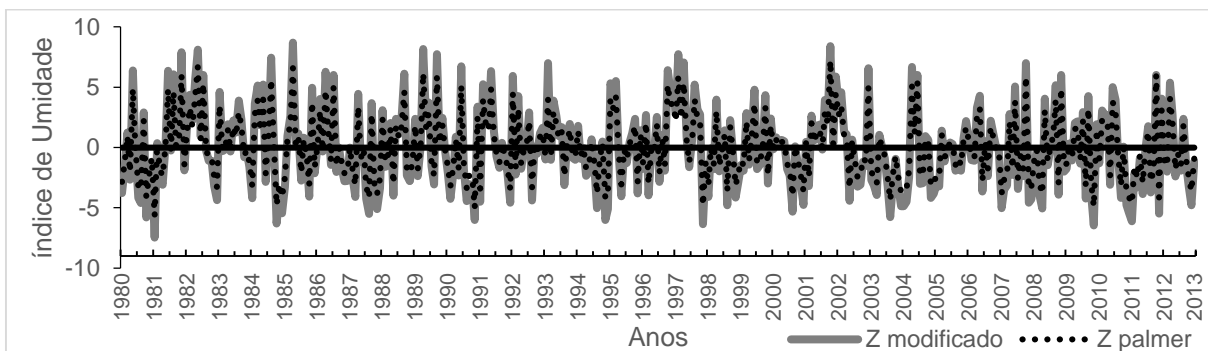


Figura 14- Índice de Umidade Z de Palmer e Z modificado para localidade de Santa Rosa/RS.

Na análise do comportamento das séries temporais, com os valores do fator de caracterização climática pela metodologia de Palmer e o valor modificado utilizando as localidades base para uma primeira aproximação, observa-se que ocorreu um aumento no número de eventos de seca, em relação à metodologia original, bem como no grau de severidade dos eventos de seca.

A avaliação dos índices de umidade Z de Palmer é importante porque não considera as condições anteriores de umidade do solo, e também o processo de calibração final. Portanto, o índice de umidade Z de Palmer responde de forma mais rápida às mudanças de umidade.

Deste modo, o índice Z modificado apresenta valores mais confiáveis para possíveis comparações entre o índice Z de Palmer. Conforme Karl (1986), Quiring e Papakryiakou (2003), o índice Z reflete as condições hídricas do mês em questão, sem a influência de meses precedentes, podendo indicar um mês úmido, em meio a uma seca prolongada.

Fernandes et al. (2010) ao analisar o índice PDSI e o Índice de Umidade Z para Goiás, no período de 1983 a 2003, concluíram que o índice Z mostrou maior ocorrência de eventos de seca, em comparação ao PDSI. Esse fato pode estar relacionado a evolução da série temporal desse índice e em razão da memória do mês anterior, considerada em sua equação final.

6.3 Modificação do Índice de Severidade de Palmer para o estado do Rio Grande do Sul

Os valores encontrados para a média mensal dos valores absolutos (D') e o fator de padronização (K') - ($D*K'$), para as 216 localidades são apresentados na Tabela 8, considerando a metodologia de Thornthwaite (1948), com capacidade de água disponível de 50, 75 e 100 mm.

Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Aceguá	23,52	23,51	23,54
Alegrete	23,46	23,44	23,37
Almirante Tamandaré do Sul	23,69	23,68	23,68
Amaral Ferrador	23,02	23,17	23,16
Antônio Prado	23,07	23,09	23,12
Arambaré	23,04	23,10	23,15
Arroio Grande	23,32	23,46	23,54
Arvorezinha	23,12	23,22	23,31
Bagé	23,67	23,64	23,61
Barão de Cotegipe	23,33	23,46	23,57
Barão do Triunfo	22,74	22,89	23,10
Barra do Quaraí	23,41	23,45	23,47
Barra do Ribeiro	22,33	22,60	23,35
Barra do Rio Azul	23,32	23,35	23,37
Barracão	24,62	24,70	24,78
Barros Cassal	23,75	23,80	23,83
Boa Vista das Missões	23,62	23,60	23,58
Boa Vista do Cadeado	23,73	23,68	23,64
Bom Jesus	22,61	22,70	22,76
Bom Retiro do Sul	22,57	22,69	22,77
Bossoroca	23,54	23,47	23,40
Butiá	22,86	22,99	23,06
Caçapava do Sul	24,65	24,73	24,80
Cacequi	23,68	23,63	23,57
Cachoeira do Sul	23,43	23,62	23,54
Cacique Doble	23,21	23,24	23,27
Calbaté	23,61	23,53	23,45
Camaquã	23,02	23,10	23,15
Cambará do Sul	22,29	22,30	22,31
Campestre da Serra	22,98	23,02	23,05
Campo Novo	24,53	24,49	24,42
Campos Borges	24,59	24,57	24,48
Candelária	23,54	23,54	23,53
Candiota	23,38	23,39	23,44
Canguçu	23,18	23,25	23,30
Canoas	22,43	22,58	22,68
Capão Bonito do Sul	23,08	23,12	23,15
Capão do Cipó	23,64	23,55	23,49
Capão do Leão	23,26	23,36	23,42
Carazinho	23,73	23,72	23,71
Carlos Barbosa	22,85	22,91	22,96
Casca	23,30	23,32	23,36
Catuípe	23,73	23,69	23,66
Caxias do Sul	22,91	22,96	22,99
Cerrito	23,51	23,57	23,60
Chapada	23,70	23,69	23,68
Cidreira	22,12	22,28	22,42
Ciriaco	24,11	24,15	24,18

Continua

Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Colinas	24,11	24,15	24,18
Condor	23,73	23,71	23,68
Coronel Bicaco	23,68	23,65	23,63
Coxinha	23,56	23,59	23,59
Cruz Alta	23,69	23,68	23,65
Cruzalense	23,44	23,46	23,47
Dezesseis de Novembro	23,51	23,43	23,35
Dilemando de Aguiar	23,66	23,60	23,48
Dois Irmãos	22,61	22,70	22,75
Dom Feliciano	22,96	22,71	23,16
Dom Pedrito	23,64	23,57	23,50
Dom Pedro de Alcântara	23,01	22,70	22,54
Dona Francisca	23,63	23,59	23,54
Eldorado do Sul	22,50	22,69	22,84
Encruzilhada do Sul	22,97	23,06	23,22
Entre Ijuís	23,72	23,66	23,61
Ernestina	23,69	23,70	23,70
Esmeralda	22,84	22,88	22,92
Espumoso	23,61	23,63	23,64
Farroupilha	23,80	23,89	23,93
Faxinalzinho	23,36	23,39	23,41
Floriano Peixoto	23,45	23,46	23,47
Fontoura Xavier	23,35	23,39	23,41
Forquetinha	23,08	23,13	23,17
Fortaleza dos Vales	23,75	23,73	23,71
Frederico Westphalen	23,44	23,45	23,46
Garruchos	23,38	23,33	23,28
Gaurama	23,30	23,31	23,34
General Câmara	22,54	22,74	22,84
Giruá	23,70	23,64	23,59
Gramado	22,57	22,64	22,71
Gravataí	23,45	23,69	23,85
Guabiju	23,20	23,22	23,26
Guaporé	23,24	23,26	23,29
Guarani das Missões	23,68	23,62	23,56
Herval	23,40	23,49	23,53
Hulha Negra	23,52	23,53	23,57
Ibiaça	23,37	23,39	23,40
Ibiraiaras	23,29	23,32	23,36
Ibirapuitã	23,55	23,57	23,58
Ibirubá	23,75	23,76	23,75
Ijuí	24,56	24,49	24,39
Independência	23,71	23,68	23,64
Ipiranga do Sul	24,17	24,21	24,21
Itacurubi	23,58	23,53	23,47
Itaqui	23,62	23,55	23,48
Jaboticaba	23,54	23,53	23,53
Jaguarão	23,25	23,43	23,54

Continua

Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Jaquirana	22,23	22,29	22,32
Jari	23,61	23,56	23,50
Jóia	23,72	23,66	23,61
Júlio de Castilhos	23,64	23,62	23,59
Lagoa Vermelha	23,03	23,07	23,11
Lavras do Sul	23,68	23,60	23,55
Maçambará	23,15	23,19	23,23
Machadinho	23,52	23,49	23,43
Manoel Viana	24,59	24,64	24,64
Marau	23,50	23,52	23,55
Mariana Pimentel	23,74	23,94	24,09
Maximiliano de Almeida	23,26	23,28	23,31
Minas do Leão	22,82	22,93	23,01
Monte Alegre dos Campos	23,01	23,06	23,10
Monte Belo do Sul	22,60	22,67	22,73
Montenegro	22,61	22,73	22,80
Mormaço	23,63	23,64	23,64
Morro Redondo	23,46	23,54	23,57
Mostardas	16,67	22,50	22,62
Muçum	23,12	23,16	23,19
Muitos Capões	23,11	23,13	23,16
Nonoáí	23,39	23,42	23,45
Nova Candelária	23,68	23,64	23,61
Nova Esperança do Sul	23,61	23,56	23,50
Nova Palma	23,59	23,57	23,53
Nova Petrópolis	23,57	23,69	23,75
Novo Barreiro	23,64	23,64	23,63
Osório	22,17	22,26	22,34
Palmares do Sul	23,07	23,41	23,68
Palmeira das Missões	23,67	23,66	23,65
Palminho	24,43	24,40	24,36
Pantano Grande	24,10	24,31	24,42
Paraíso do Sul	24,48	24,46	24,42
Parobé	23,34	23,53	23,68
Passo Fundo	23,60	23,61	25,43
Pedras Altas	24,67	24,80	24,92
Pejuçara	23,74	23,69	23,66
Pelotas	23,15	23,26	23,34
Pinhal da Serra	22,81	22,86	22,89
Pinheiro Machado	23,46	23,60	23,61
Piratini	23,40	23,40	23,42
Planalto	23,43	23,45	23,46
Pontão	23,65	23,66	23,65
Porto Alegre	24,59	24,53	24,44
Porto Lucena	22,29	22,52	22,62
Porto Mauá	24,68	24,62	24,53
Porto Xavier	23,69	23,65	23,61
Quaraí	23,40	23,40	23,38

Continua

Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Quevedos	24,57	24,52	24,46
Redentora	23,61	23,58	23,56
Relvado	24,10	24,16	24,17
Restinga seca	23,62	23,61	23,57
Rio Grande	24,27	24,51	24,72
Rio Pardo	23,41	23,44	23,44
Riozinho	22,11	22,19	22,23
Rolante	22,24	22,33	22,38
Ronda Alta	23,56	23,57	23,57
Rondinha	23,64	23,63	23,63
Rosário do Sul	23,67	23,60	23,54
Saldanha Marinho	23,72	23,71	23,71
Sananduva	23,34	23,36	23,37
Santa Bárbara do Sul	24,14	24,21	24,26
Santa Cruz do Sul	24,96	25,00	25,02
Santa Margarida do Sul	23,40	23,42	23,43
Santa Maria	23,67	23,59	26,19
Santa Rosa	19,07	19,24	19,26
Santa Vitória do Palmar	23,49	23,48	23,48
Santana da Boa Vista	23,64	23,56	23,49
Sant'ana do Livramento	23,65	23,56	23,48
Santiago	24,45	24,42	24,36
Santo Antônio da Patrulha	23,70	23,68	23,64
Santo Augusto	23,53	23,48	23,42
São Antônio das Missões	23,56	23,53	23,48
São Borja	22,56	22,61	22,65
São Francisco de Assis	23,72	23,66	23,61
São Francisco de Paula	22,80	23,03	23,19
São Gabriel	23,05	23,05	23,07
São José do Norte	23,14	23,21	23,27
São José dos Ausentes	23,52	23,41	23,33
São Lourenço do Sul	23,63	23,53	23,45
São Luiz Gonzaga	23,51	23,42	23,34
São Miguel das Missões	23,57	23,51	23,44
São Nicolau	23,58	23,55	23,52
São Pedro do Butiá	22,67	22,76	22,82
São Pedro do Sul	23,63	23,72	23,65
São Sebastião do Cai	22,78	22,84	22,89
São Sepé	23,59	23,56	23,52
São Vendelino	23,52	23,50	23,48
São Vicente do Sul	22,86	22,91	22,97
Segredo	23,29	23,32	23,34
Sentinela do Sul	23,65	23,63	23,59
Severiano de Almeida	23,39	23,41	23,41
Silveira Martins	23,58	23,54	23,52
Sinimbu	23,52	23,55	23,56
Sobradinho	23,28	23,52	23,70

Continua

Tabela 8- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Thornthwaite (1948)

Localidade	Capacidade de Água Disponível		
	50	75	100
Soledade	23,70	23,69	23,66
Tapera	23,73	23,74	23,74
Tapes	22,59	22,70	22,80
Tavares	22,89	22,97	23,09
Tenente Portela	23,52	23,50	23,49
Terras de Areia	22,38	22,40	22,44
Três Forquilhas	22,31	22,32	22,35
Três Palmeiras	23,49	23,50	23,51
Triunfo	22,50	22,67	22,78
Tucunduva	23,70	23,65	23,62
Tunas	23,55	23,57	23,57
Tupanciretã	23,64	23,55	23,49
Unistalda	23,65	23,60	23,54
Uruguaiana	23,39	23,39	23,37
Vacaria	22,74	22,79	22,83
Vale do Sol	24,32	23,43	23,43
Vale Verde	22,84	22,97	23,04
Venâncio Aires	23,25	23,29	23,31
Viamão	22,15	22,32	22,44
Vicente Dutra	23,27	23,32	23,34
Vila Flores	23,95	24,02	24,08
Vila Lângaro	23,48	23,50	23,51
Vila Maria	23,45	23,45	23,47
Vila Nova do Sul	24,86	24,92	24,94
Vitória das Missões	23,67	23,59	23,54

Na Tabela 8 foi obtido um novo fator de caracterização climático para as 216 localidades do Estado, considerando-se a estimativa da ET_0 pelo método de Thornthwaite (1948), para cada valor de Capacidade de Água Disponível, sendo 23,37 para CAD igual a 50 mm (Equação 40), 23,42 para CAD de 75 mm (Equação 41) e 23,46 para CAD de 100 mm (Equação 42).

$$K = \frac{23,37 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (40)$$

$$K = \frac{23,42 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (41)$$

$$K = \frac{23,46 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (42)$$

Na Tabela 9 são apresentados os valores de ponderação (D^*K') médio para a metodologia de Penman-Monteith (FAO) e suas respectivas CAD's de solo 50, 75 e 100 mm.

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Aceguá	24,61	24,74	24,84
Alegrete	24,60	24,66	24,67
Almirante Tamandaré do Sul	24,48	24,46	24,43
Amaral Ferrador	24,09	24,26	24,40
Antônio Prado	23,86	23,95	24,01
Arambaré	24,16	24,32	24,43
Arroio Grande	24,83	24,99	25,12
Arvorezinha	23,93	24,15	24,23
Bagé	24,77	24,83	24,88
Barão de Cotegipe	23,93	24,15	24,38
Barão do Triunfo	23,87	24,03	24,16
Barra do Quaraí	24,32	24,35	24,31
Barra do Ribeiro	23,58	23,81	23,99
Barra do Rio Azul	24,13	24,16	24,15
Barracão	24,62	24,70	24,78
Barros Cassal	23,75	23,80	23,83
Boa Vista das Missões	24,49	24,45	24,39
Boa Vista do Cadeado	24,61	24,53	24,43
Bom Jesus	23,33	23,45	23,56
Bom Retiro do Sul	23,69	23,88	23,99
Bossoroca	24,46	24,41	24,34
Butiá	23,94	24,15	24,27
Caçapava do Sul	24,65	24,73	24,80
Cacequi	24,78	24,78	24,77
Cachoeira do Sul	24,48	24,63	24,73
Cacique Doble	24,76	23,97	24,00
Calbaté	24,59	24,50	24,39
Camaquã	24,10	24,26	24,41
Cambará do Sul	23,01	23,07	23,11
Campestre da Serra	23,65	23,77	23,86
Campo Novo	24,53	24,49	24,42
Campos Borges	24,59	24,57	24,48
Candelária	24,48	24,54	24,54
Candiota	24,52	24,66	24,75
Canguçu	24,14	24,29	24,45
Canoas	23,52	23,76	23,92
Capão Bonito do Sul	23,82	23,89	23,95
Capão do Cipó	24,50	24,43	24,37
Capão do Leão	24,25	24,45	24,62
Carazinho	24,53	24,49	24,46
Carlos Barbosa	23,83	23,91	23,96

Continua

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Casca	24,09	24,14	24,17
Catuípe	24,61	24,53	24,43
Caxias do Sul	23,63	23,73	23,73
Cerrito	24,35	24,48	24,59
Chapada	24,50	24,47	24,44
Cidreira	23,19	23,47	23,69
Ciriaco	24,11	24,15	24,18
Colinas	23,86	23,94	23,99
Condor	24,53	24,47	24,39
Coronel Bicaco	24,49	24,44	24,37
Coxinha	24,27	24,29	24,26
Cruz Alta	24,59	24,54	24,45
Cruzalense	24,26	24,24	24,22
Dezesseis de Novembro	24,52	24,48	24,39
Dilemando de Aguiar	24,61	24,64	24,64
Dois Irmãos	23,53	23,68	23,79
Dom Feliciano	24,04	24,23	24,33
Dom Pedrito	24,85	24,88	24,89
Dom Pedro de Alcântara	23,36	23,41	23,46
Dona Francisca	24,53	24,50	24,45
Eldorado do Sul	23,64	23,89	24,05
Encruzilhada do Sul	24,06	24,28	24,41
Entre Ijuís	24,59	24,50	24,40
Ernestina	24,46	24,44	24,41
Esmeralda	23,62	23,74	23,82
Espumoso	24,51	24,50	24,45
Farroupilha	23,80	23,89	23,93
Faxinalzinho	24,20	24,21	24,20
Floriano Peixoto	24,14	24,16	24,16
Fontoura Xavier	24,24	24,29	24,28
Forquetinha	24,04	24,13	24,14
Fortaleza dos Vales	24,65	24,60	24,50
Frederico Westphalen	24,40	24,38	24,34
Garruchos	24,44	24,42	24,38
Gaurama	24,07	24,10	24,11
General Câmara	23,67	23,86	23,99
Giruá	24,63	24,55	24,45
Gramado	23,50	23,62	23,70
Gravataí	23,45	23,69	23,85
Guabiju	23,99	24,05	24,09
Guaporé	24,04	24,10	24,12
Guarani das Missões	24,65	24,59	24,49
Herval	24,51	24,66	24,82
Hulha Negra	24,68	24,81	24,92
Ibiaça	24,06	24,09	24,11
Ibiraiaras	24,02	24,08	24,12
Ibirapuitã	24,32	24,34	24,32

Continua

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Ibirubá	24,64	24,61	24,53
Ijuí	24,56	24,49	24,39
Independência	24,60	24,53	24,44
Ipiranga do Sul	24,17	24,21	24,21
Itacurubi	24,49	24,47	24,44
Itaqui	24,63	24,68	24,69
Jaboticaba	24,43	24,41	24,35
Jaguarão	24,36	24,58	24,79
Jaquirana	23,08	23,20	23,30
Jari	24,54	24,53	24,49
Jóia	24,57	24,48	24,38
Júlio de Castilhos	24,51	24,48	24,39
Lagoa Vermelha	23,75	23,82	23,87
Lavras do Sul	24,97	24,99	24,98
Maçambará	23,86	23,92	23,95
Machadinho	24,62	24,69	24,70
Manoel Viana	24,59	24,64	24,64
Marau	24,22	24,25	24,28
Mariana Pimentel	23,74	23,94	24,09
Maximiliano de Almeida	24,00	24,03	24,06
Minas do Leão	23,91	24,09	24,21
Monte Alegre dos Campos	23,93	24,02	24,06
Monte Belo do Sul	23,45	23,58	23,67
Montenegro	23,68	23,88	23,98
Mormaço	24,45	24,43	24,40
Morro Redondo	24,36	24,49	24,60
Mostardas	23,21	23,58	23,87
Muçum	23,99	24,07	24,09
Muitos Capões	23,83	23,92	23,99
Nonoaí	24,30	24,31	24,28
Nova Candelária	24,60	24,54	24,47
Nova Esperança do Sul	24,49	24,54	24,50
Nova Palma	24,45	24,40	24,31
Nova Petrópolis	23,57	23,69	23,75
Novo Barreiro	24,45	24,43	24,40
Osório	23,19	23,42	23,63
Palmares do Sul	23,07	23,41	23,68
Palmeira das Missões	24,49	24,46	24,41
Palminho	24,43	24,40	24,36
Pantano Grande	24,10	24,31	24,42
Paraíso do Sul	24,48	24,46	24,42
Parobé	23,34	23,53	23,68
Passo Fundo	24,26	24,26	24,26
Pedras Altas	24,67	24,80	24,92
Pejuçara	24,58	24,51	24,43
Pelotas	23,93	24,15	24,38
Pinhal da Serra	23,53	23,63	23,71

Continua

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
Pinheiro Machado	24,51	24,65	24,77
Piratini	24,38	24,48	24,57
Planalto	24,37	24,36	24,32
Pontão	24,41	24,39	24,37
Porto Alegre	24,59	24,53	24,44
Porto Lucena	23,12	23,43	23,65
Porto Mauá	24,68	24,62	24,53
Porto Xavier	24,68	24,62	24,55
Quaraí	24,66	24,69	24,69
Quevedos	24,57	24,52	24,46
Redentora	24,48	24,45	24,39
Relvado	24,10	24,16	24,17
Restinga seca	24,57	24,60	24,60
Rio Grande	24,27	24,51	24,72
Rio Pardo	24,37	24,46	24,48
Riozinho	23,10	23,29	23,43
Rolante	23,22	23,41	23,57
Ronda Alta	24,31	24,31	24,29
Rondinha	24,42	24,40	24,38
Rosário do Sul	24,94	24,96	24,96
Saldanha Marinho	24,56	24,53	24,48
Sananduva	24,04	24,08	24,09
Santa Bárbara do Sul	24,14	24,21	24,26
Santa Cruz do Sul	24,96	25,00	25,02
Santa Margarida do Sul	24,23	24,32	24,39
Santa Maria	24,63	24,53	24,74
Santa Rosa	23,95	24,23	24,51
Santa Vitória do Palmar	24,52	24,66	24,76
Santana da Boa Vista	24,85	24,88	24,87
Sant'ana do Livramento	24,53	24,48	24,43
Santiago	24,45	24,42	24,36
Santo Antônio da Patrulha	24,93	24,87	24,78
Santo Augusto	24,45	24,49	24,46
São Antônio das Missões	24,58	24,61	24,58
São Borja	23,30	23,43	23,52
São Francisco de Assis	25,02	25,04	25,06
São Francisco de Paula	23,82	24,15	24,47
São Gabriel	23,05	23,05	23,07
São José do Norte	24,05	24,20	24,39
São José dos Ausentes	24,49	24,44	24,35
São Lourenço do Sul	24,53	24,45	24,35
São Luiz Gonzaga	24,48	24,46	24,40
São Miguel das Missões	24,58	24,52	24,42
São Nicolau	24,61	24,60	24,57
São Pedro do Butiá	23,67	23,83	23,93
São Pedro do Sul	24,72	24,85	24,89
São Sebastião do Cai	23,68	23,78	23,85

Continua

Tabela 9- Valores do fator de ponderação para as 216 localidades do estado do Rio Grande do Sul com Capacidade de Água Disponível de 50, 75 e 100 mm, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO)

Localidade	Capacidade de Água Disponível (mm)		
	50	75	100
São Sepé	24,59	24,60	24,56
São Vendelino	24,36	24,37	24,34
São Vicente do Sul	23,99	24,17	24,27
Segredo	24,06	24,07	24,08
Sentinela do Sul	24,50	24,48	24,47
Severiano de Almeida	24,28	24,31	24,31
Silveira Martins	24,40	24,38	24,33
Sinimbu	24,38	24,40	24,38
Sobradinho	23,28	23,52	23,70
Soledade	24,57	24,52	24,46
Tapera	24,58	24,56	24,51
Tapes	23,82	24,03	24,17
Tavares	23,78	24,06	24,35
Tenente Portela	24,46	24,42	24,36
Terras de Areia	23,29	23,41	23,52
Três Forquilhas	23,21	23,31	23,39
Três Palmeiras	24,35	24,33	24,30
Triunfo	23,67	23,86	24,00
Tucunduva	24,67	24,59	24,52
Tunas	24,44	24,44	24,39
Tupanciretã	24,51	24,48	24,41
Unistalda	24,56	24,56	24,53
Uruguaiana	24,69	24,74	24,74
Vacaria	23,30	23,44	23,54
Vale do Sol	24,32	24,36	24,37
Vale Verde	23,94	24,09	24,17
Venâncio Aires	24,19	24,23	24,23
Viamão	23,24	23,54	23,78
Vicente Dutra	24,24	24,26	24,24
Vila Flores	23,95	24,02	24,08
Vila Lângaro	24,16	24,18	24,18
Vila Maria	24,20	24,24	24,25
Vila Nova do Sul	24,86	24,92	24,94
Vitória das Missões	24,59	24,50	24,39

Na Tabela 9 observam-se os valores encontrados para o fator padronizado (K'), a partir dos valores dos desvios médios (D), para a estimativa de ET_0 para a método de Penman-Monteith (FAO), adotando os valores de CAD de 50, 75 e 100 mm. Os resultados encontrados para a modificação do fator de caracterização climática foi para CAD de 50 mm, 24,20 (Equação 43), para CAD de 75 mm, 24,26 (Equação 44) e para CAD de 100 mm, o valor de 24,29 (Equação 45).

$$K = \frac{24,20 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (43)$$

$$K = \frac{24,26 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (44)$$

$$K = \frac{24,29 * K'}{\sum_1^{12} \overline{D'K'}} \quad (45)$$

Deste modo foi obtido um novo valor de caracterização climática, considerando as estimativas para duas metodologias de ET_0 , sob diferentes valores de CAD's. Os valores encontrados possibilitam que o PDSI modificado para o Estado, possa ser empregado para quantificação dos eventos de seca com maior precisão, por utilizar dados climáticos da própria região de interesse.

Observa-se que os valores finais do fator de caracterização climática, para as diferentes CAD's no solo, apresentaram valores com pequena diferença entre si para as duas estimativas de evapotranspiração de referência.

Blain (2005) adaptou e avaliou o índice PDSI para as condições climáticas do estado de São Paulo, utilizando dados de onze postos meteorológicos, para o período de 1960 a 2003. O autor encontrou o valor de caracterização climática (K) de 22,80, concluindo que o mesmo constitui em uma nova ferramenta padronizada para o estado de São Paulo.

6.4 Análise do índice de severidade de seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul

6.4.1 Estimativas da Evapotranspiração de Referência (ET_0)

Nas Figuras 15 a 35 são apresentadas as médias mensais da ET_0 estimadas pelo método de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO).

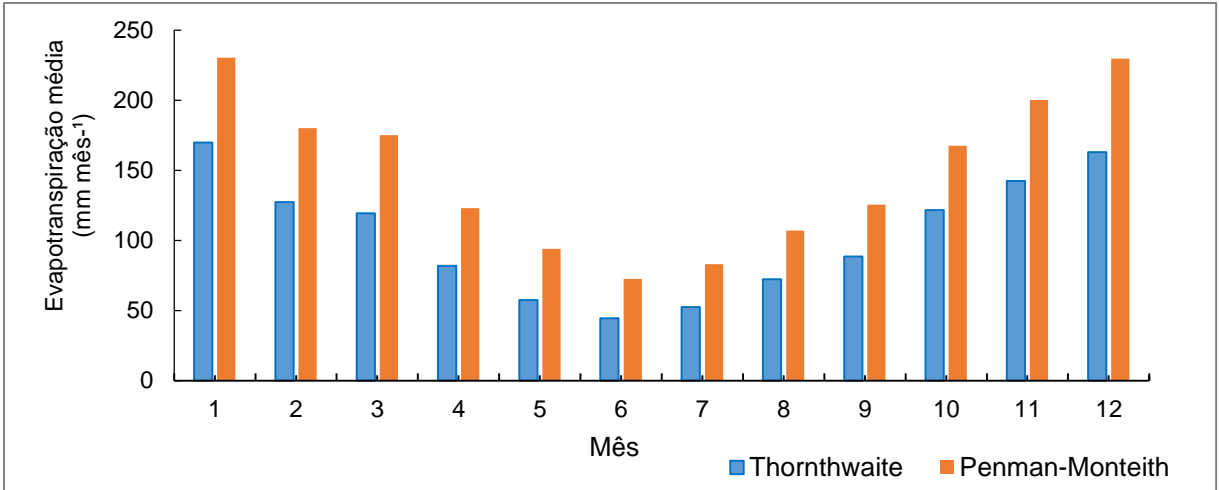


Figura 15– Médias mensais da ET₀ para a localidade de Alegrete, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

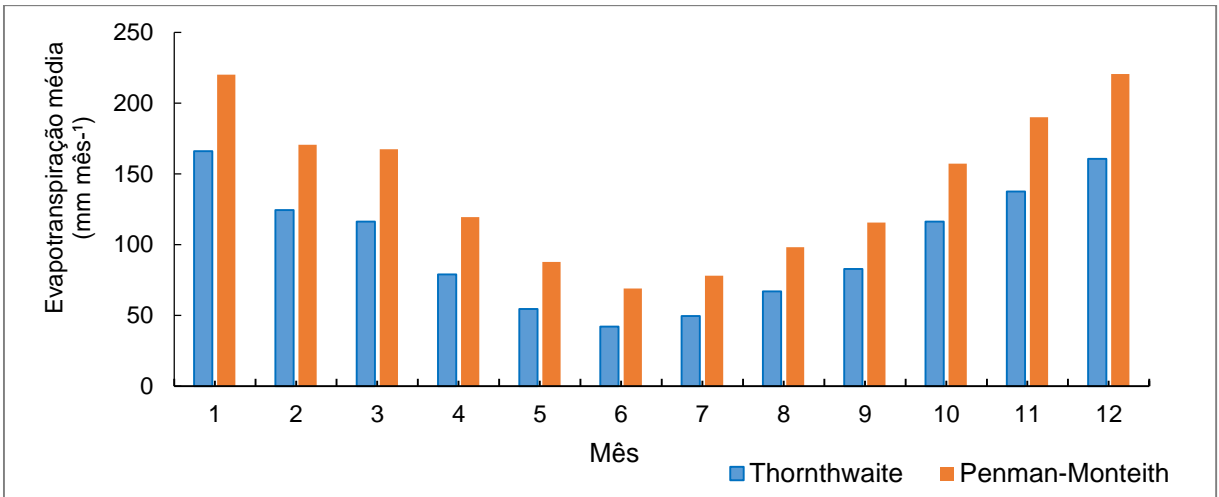


Figura 16- Médias mensais da ET₀ para a localidade de Bagé, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

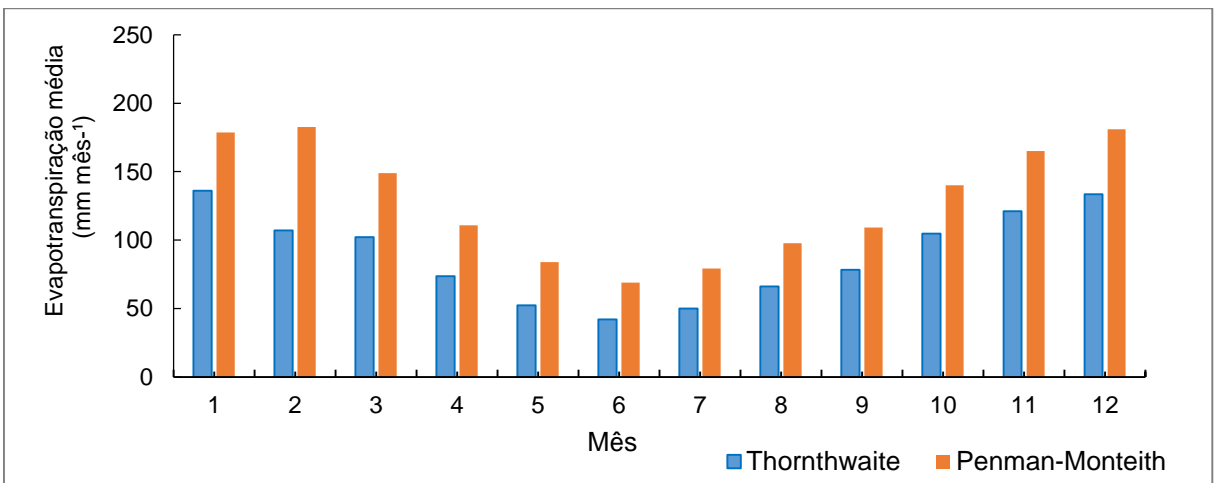


Figura 17- Médias mensais da ET₀ para a localidade de Bom Jesus, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

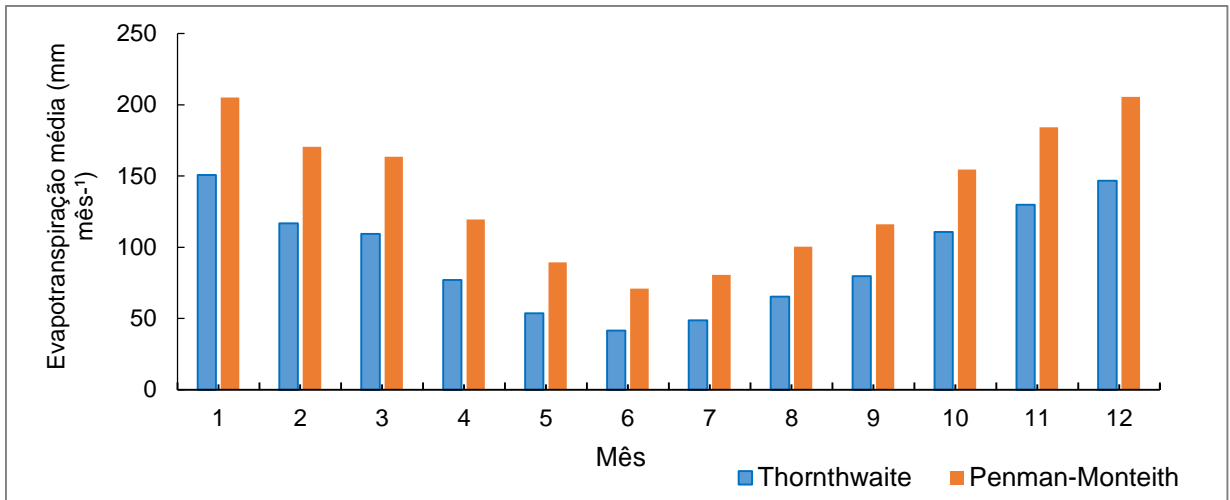


Figura 18– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Bom Retiro do Sul, utilizando o método de Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO).

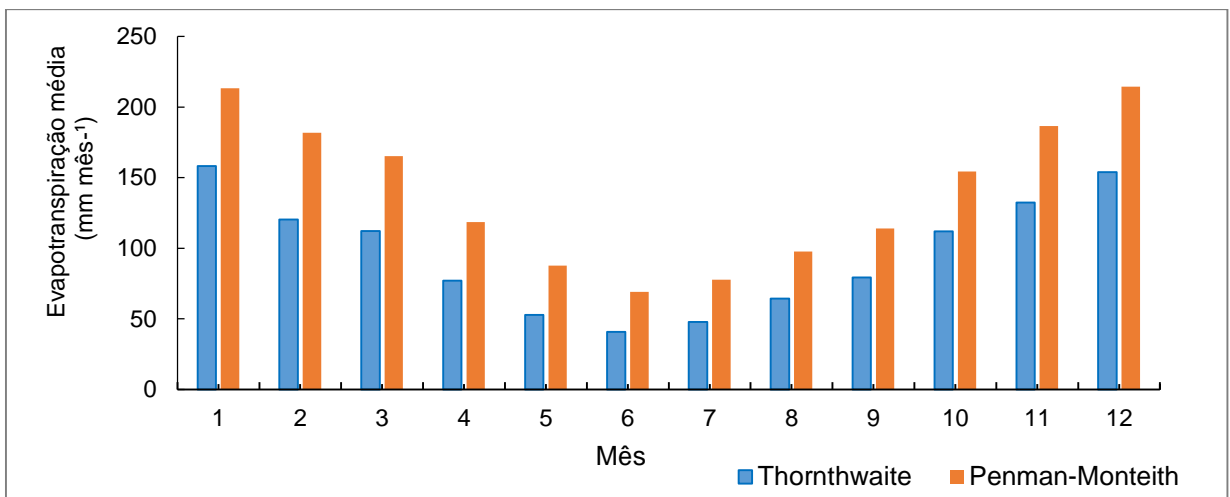


Figura 19- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Cachoeira do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

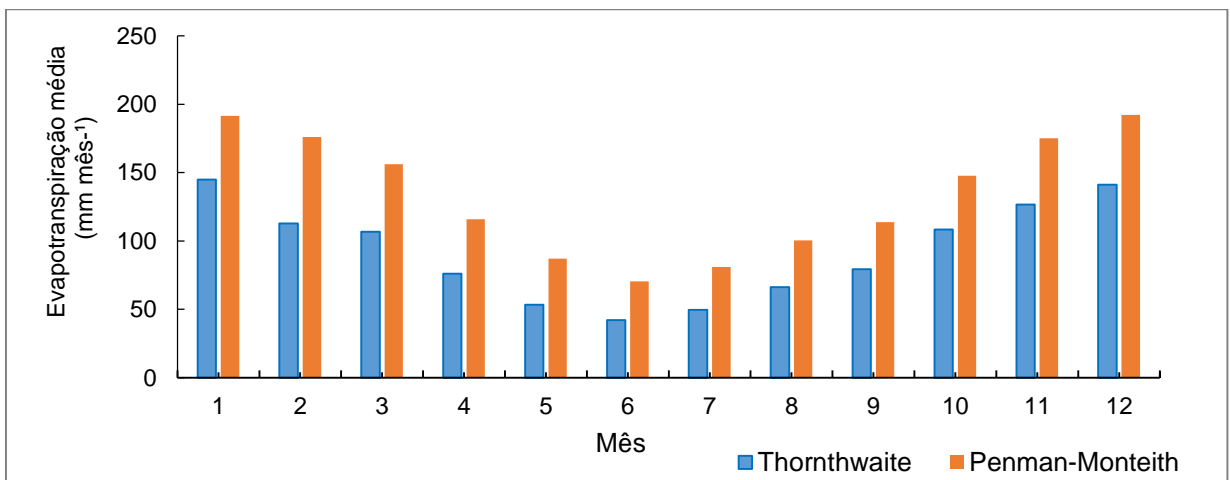


Figura 20- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Caxias do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

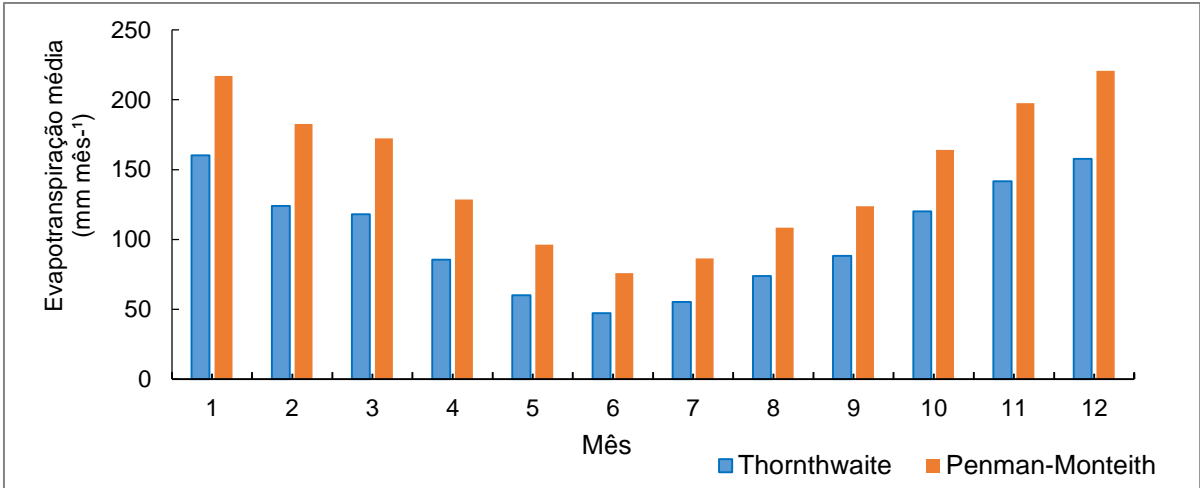


Figura 21- Médias mensais da ET₀ para a localidade de Cruz Alta, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

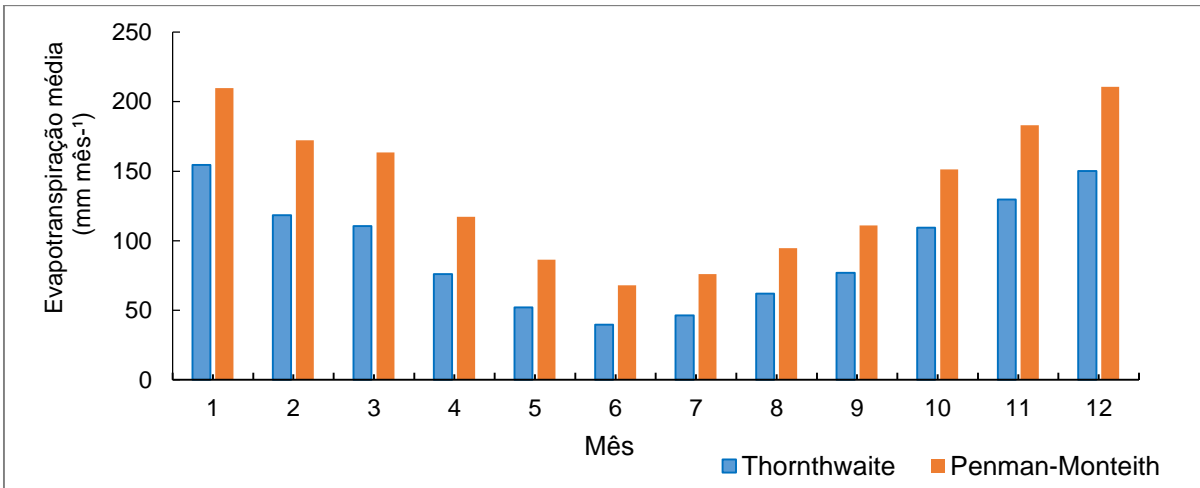


Figura 22- Médias mensais da ET₀ para a localidade de Encruzilhada do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

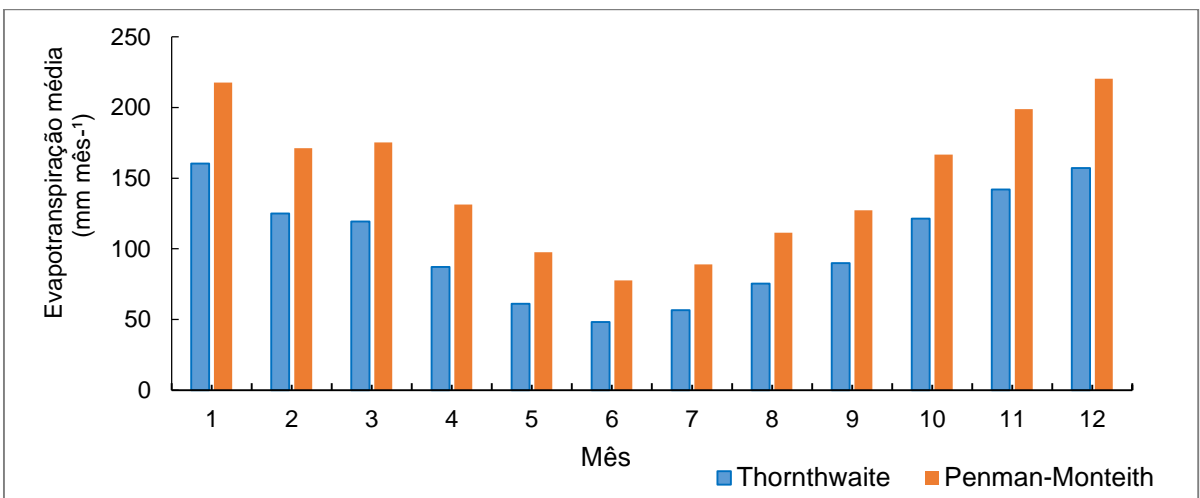


Figura 23- Médias mensais da ET₀ para a localidade de Ijuí, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

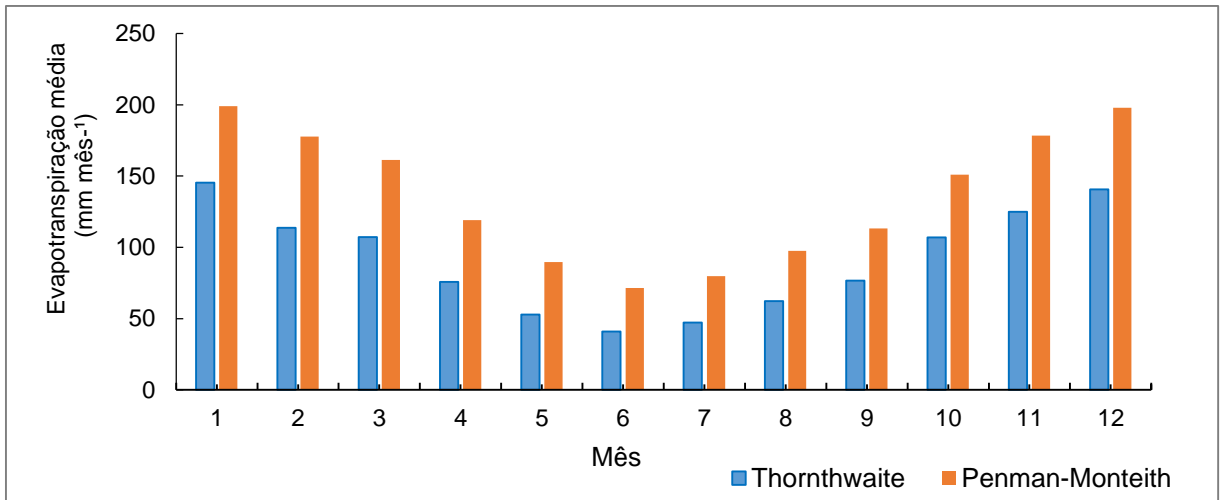


Figura 24– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Osório, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

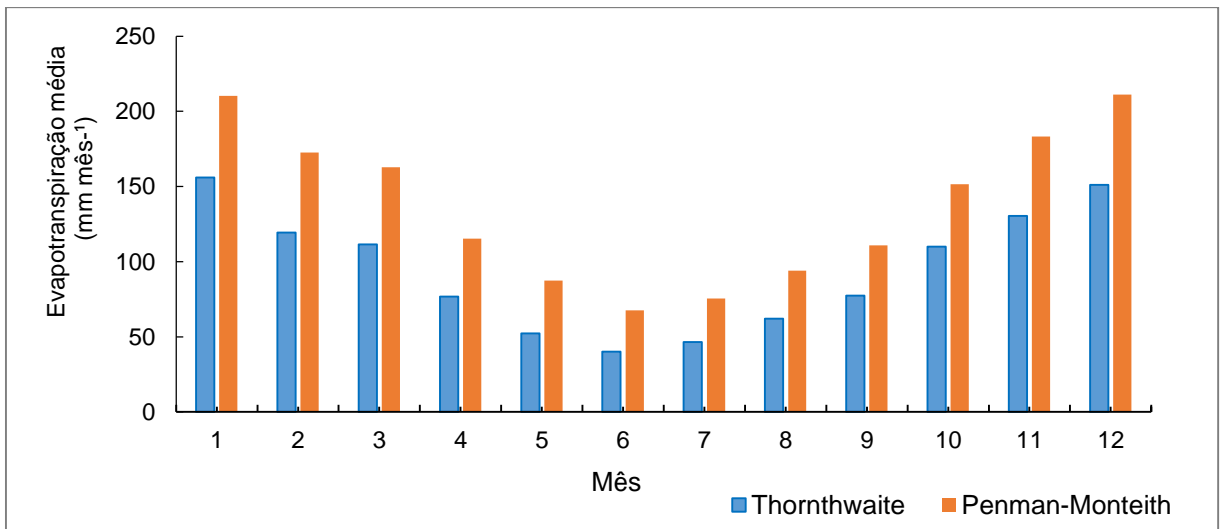


Figura 25– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Pelotas, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

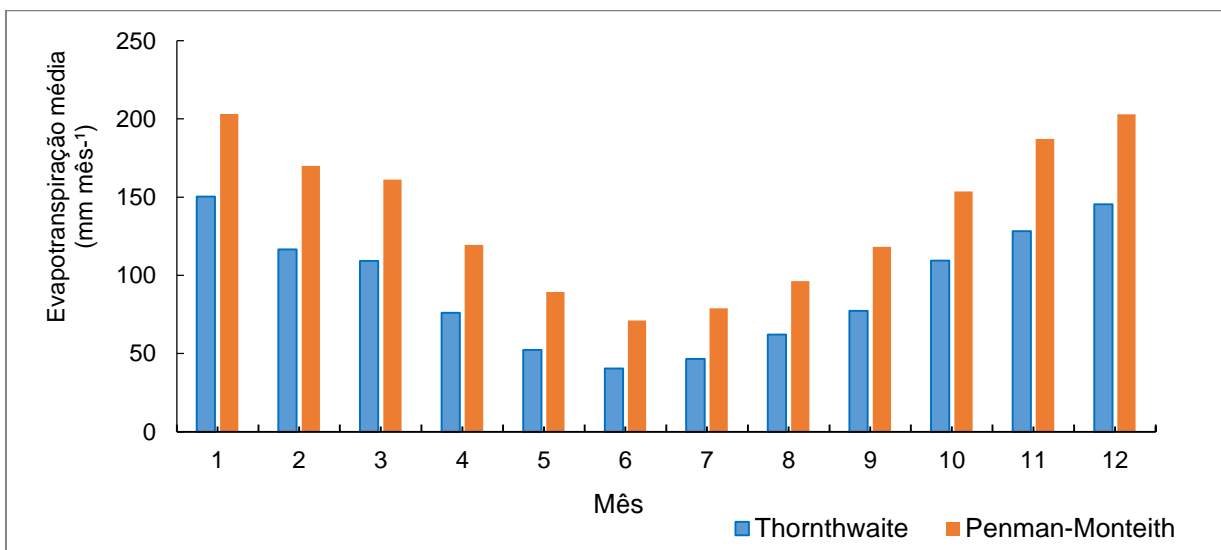


Figura 26- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Porto Alegre, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

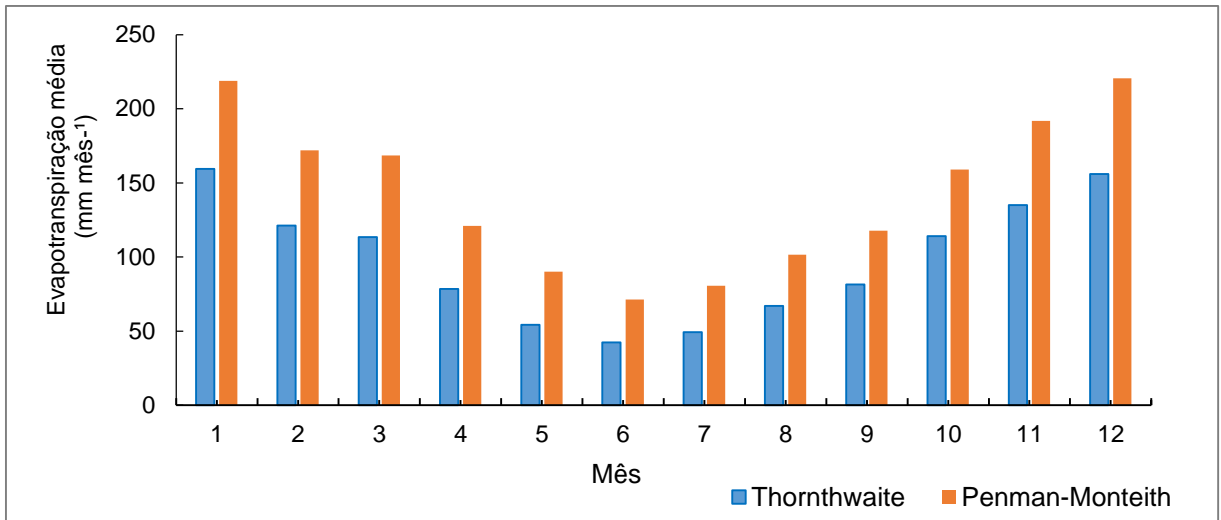


Figura 27– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Restinga Seca, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

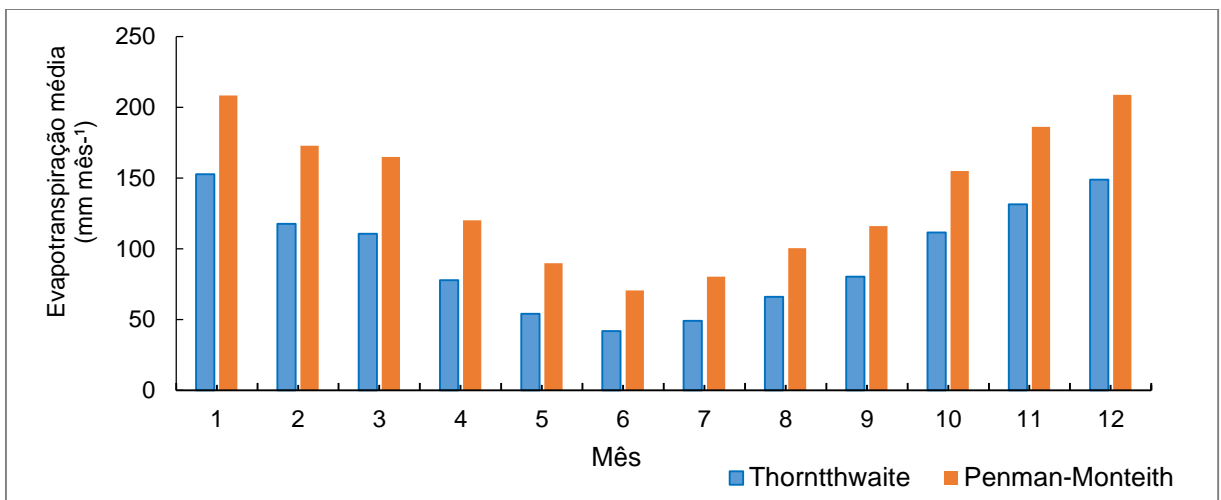


Figura 28– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Cruz do Sul, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

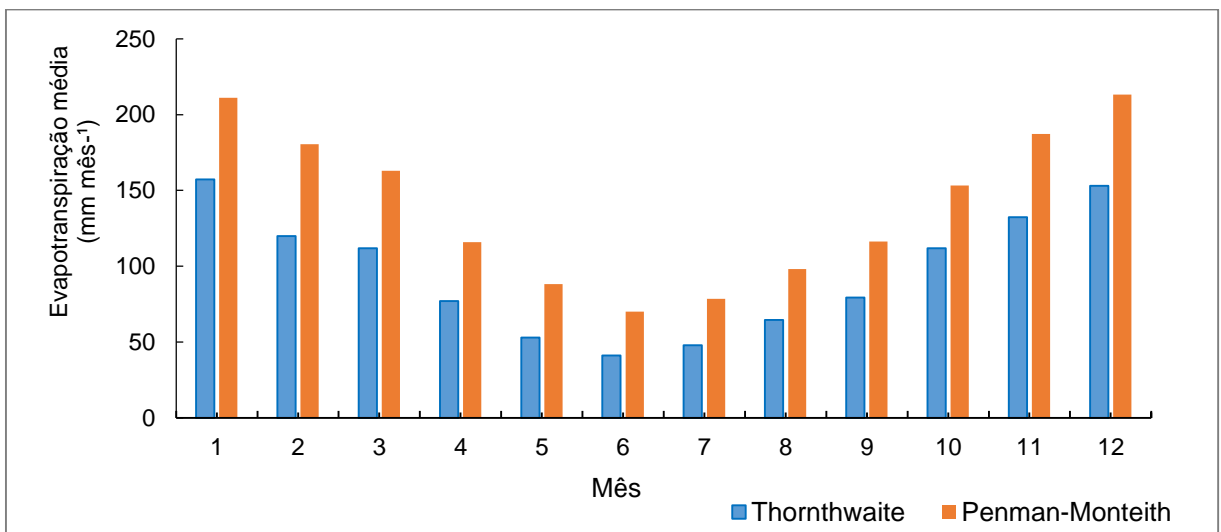


Figura 29– Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Maria, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

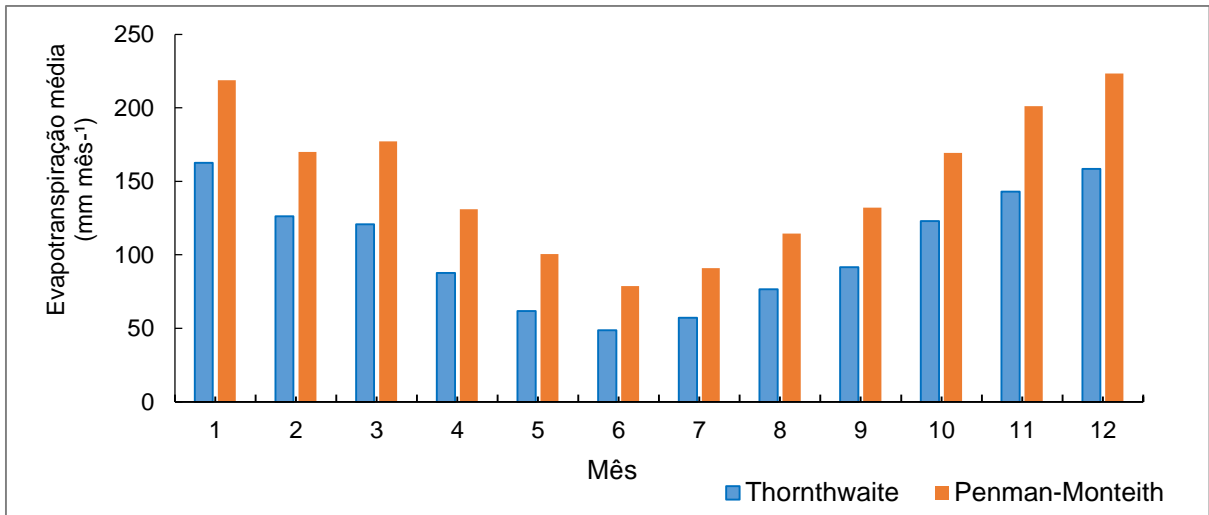


Figura 30- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Rosa, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

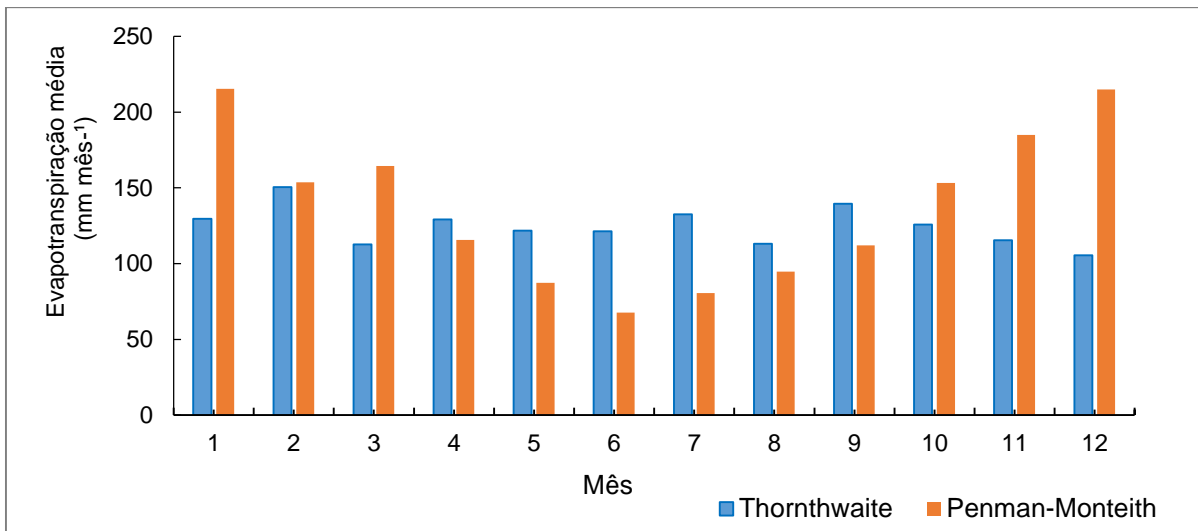


Figura 31- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santa Vitória do Palmar, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

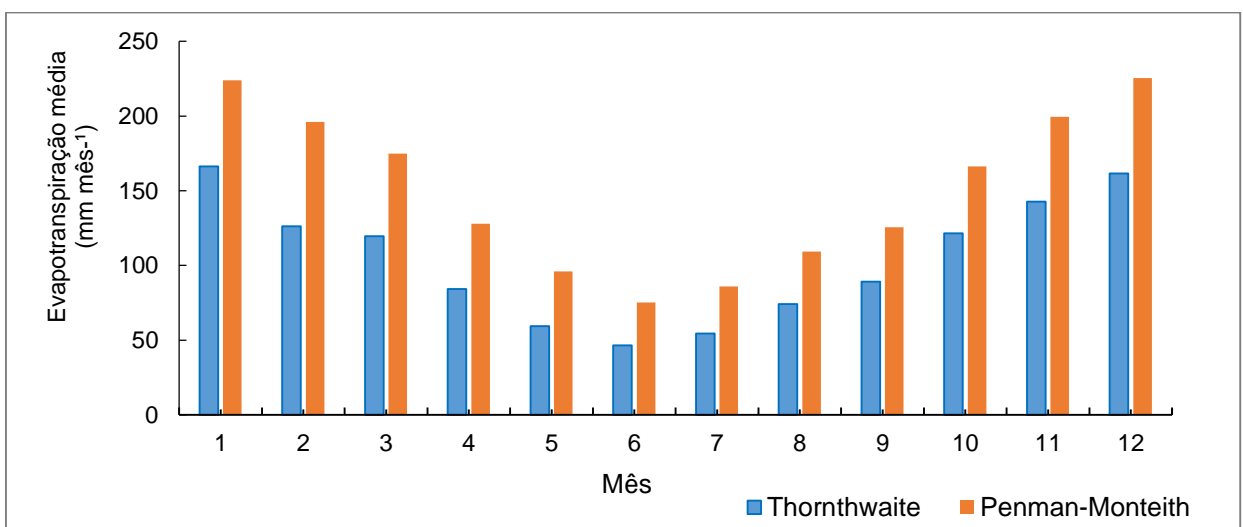


Figura 32- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Santiago, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

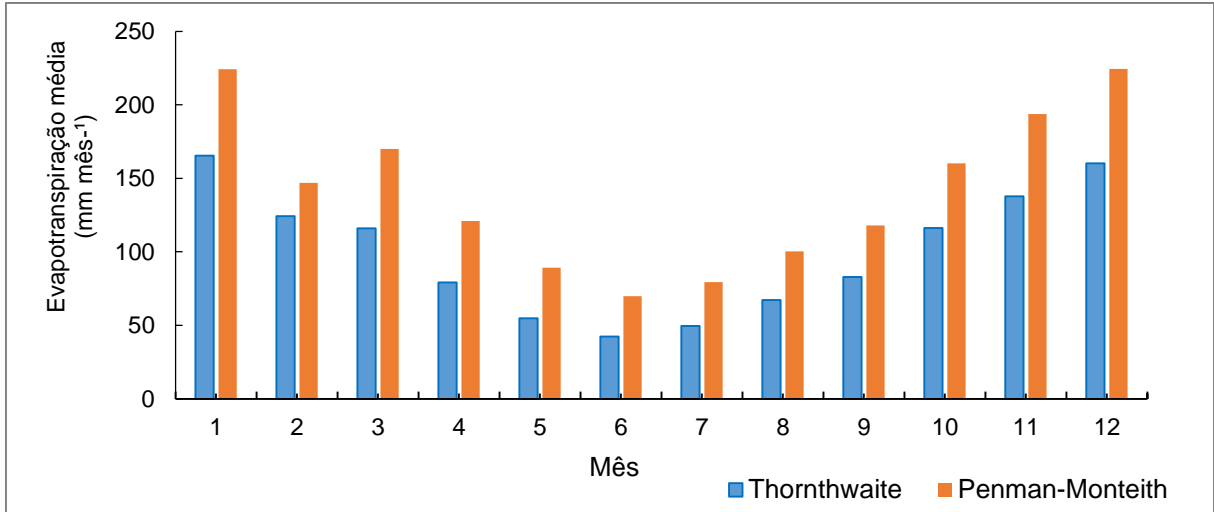


Figura 33- Médias mensais da ET_0 para a localidade de São Gabriel, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

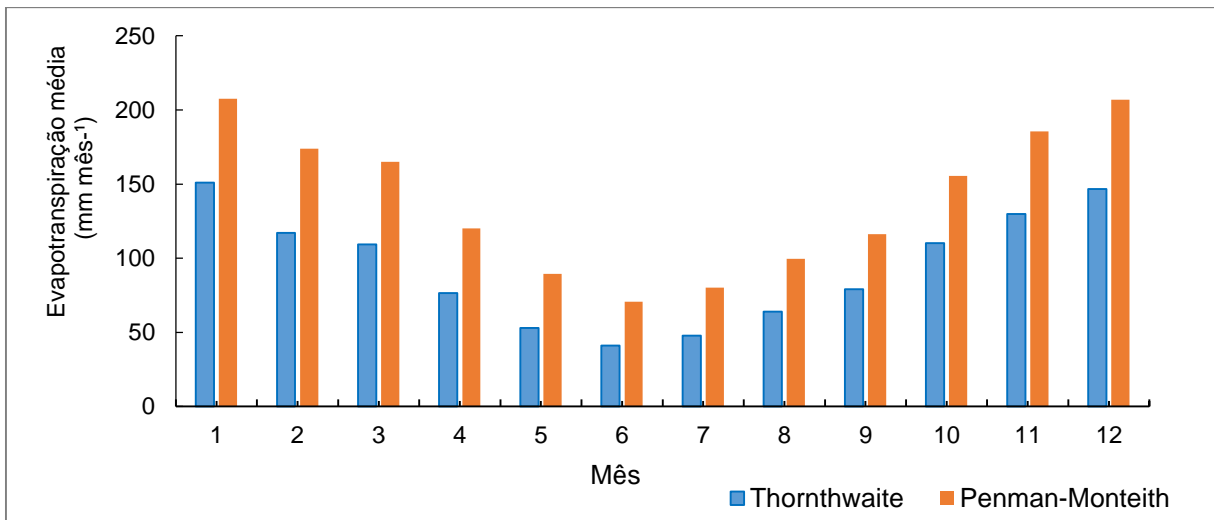


Figura 34- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Triunfo, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

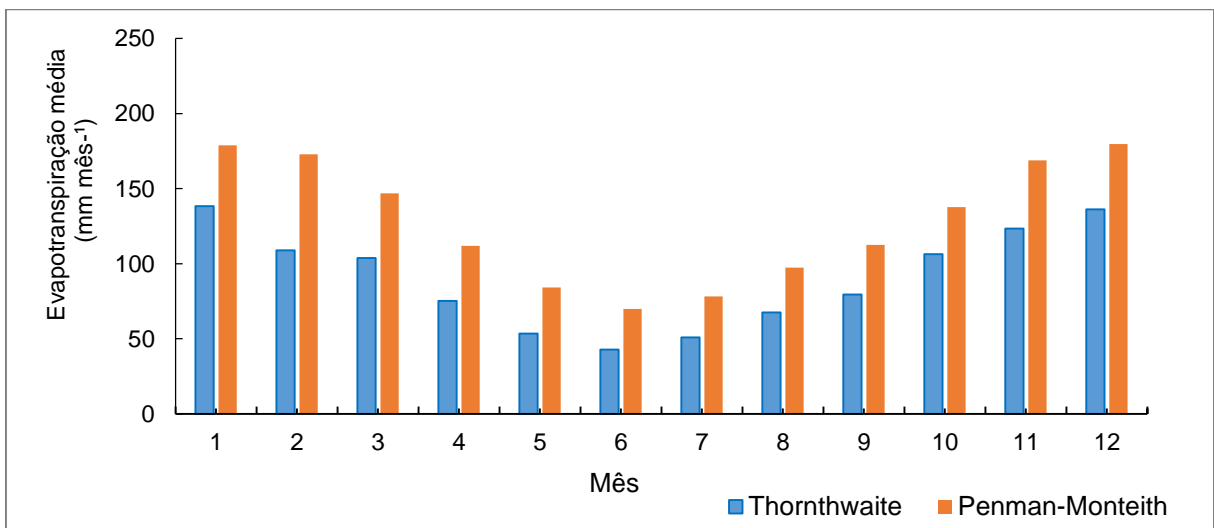


Figura 35- Médias mensais da ET_0 para a localidade de Vacaria, utilizando o método de Thornthwaite e Penman-Monteith (FAO).

Os maiores valores de ET_0 mensal encontrados foram considerando a estimativa pelo método de Penman-Monteith (FAO), tendo em vista que este método leva em seu equacionamento vários elementos climáticos, e o método desenvolvido por Thornthwaite (1948) utiliza somente dados de temperaturas médias.

Figueredo Júnior et al. (2005) ressaltam que os métodos que utilizam somente dados de temperatura do ar tendem a limitar as condições climáticas para estimativa da ET_0 , já que, dependendo das condições de umidade relativa do ar e velocidade do vento, a estimativa de ET_0 será diferente para os mesmos valores de temperatura do ar.

Dai (2011) resalta que o modelo original de Palmer poderia levar a erros em algumas regiões por utilizar a metodologia de Thornthwaite, já que a mesma é baseada apenas na temperatura média do ar e latitude. Usando a equação de Penman-Monteith (FAO) este erro pode ser minimizado, no entanto o mesmo considera os efeitos da radiação, umidade e velocidade do vento. Palmer (1965) escolheu Thornthwaite, principalmente com base em considerações práticas como dados que podem ser indisponíveis para as estimativas de outras metodologias para a ET_0 .

6.4.2 Análise de ocorrências de eventos de seca para o índice PDSI-RS

Nas Figuras 36 a 77 são apresentadas as séries temporais do índice PDSI-RS, para as localidades descritas na Tabela 5, com base na nova equação de caracterização climática, para os diferentes valores de CAD (50, 75 e 100 mm) e estimativas de evapotranspiração por Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO).

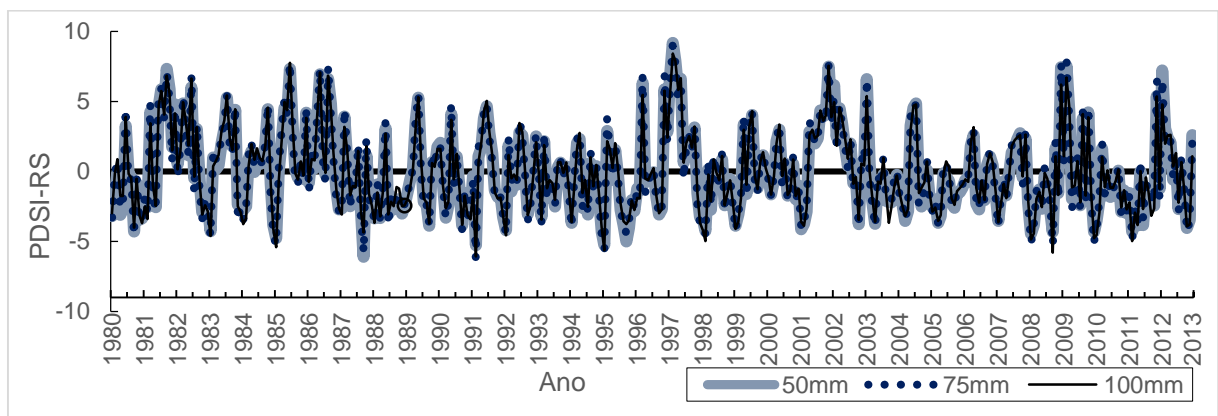


Figura 36- Índice PDSI-RS para a localidade de Alegrete/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

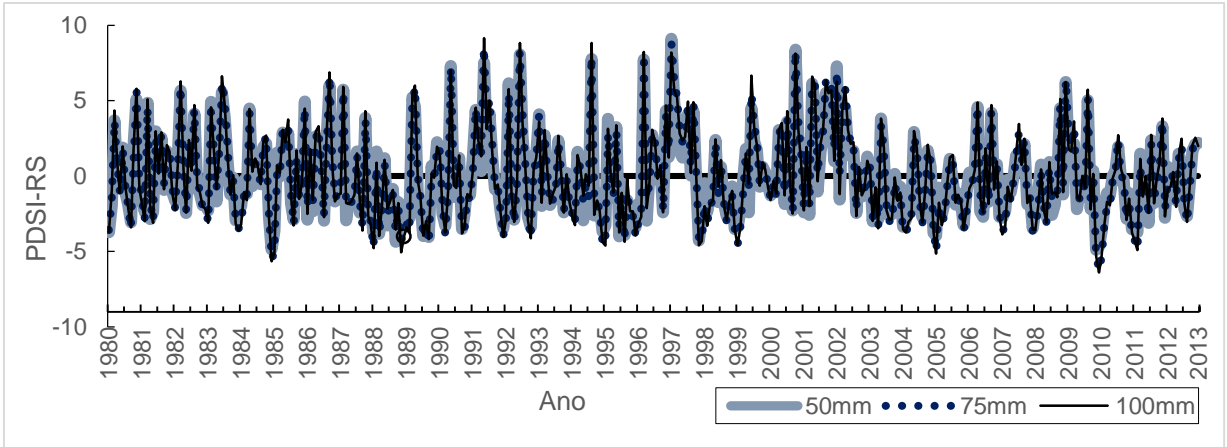


Figura 37- Índice PDSI-RS para a localidade de Bagé/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

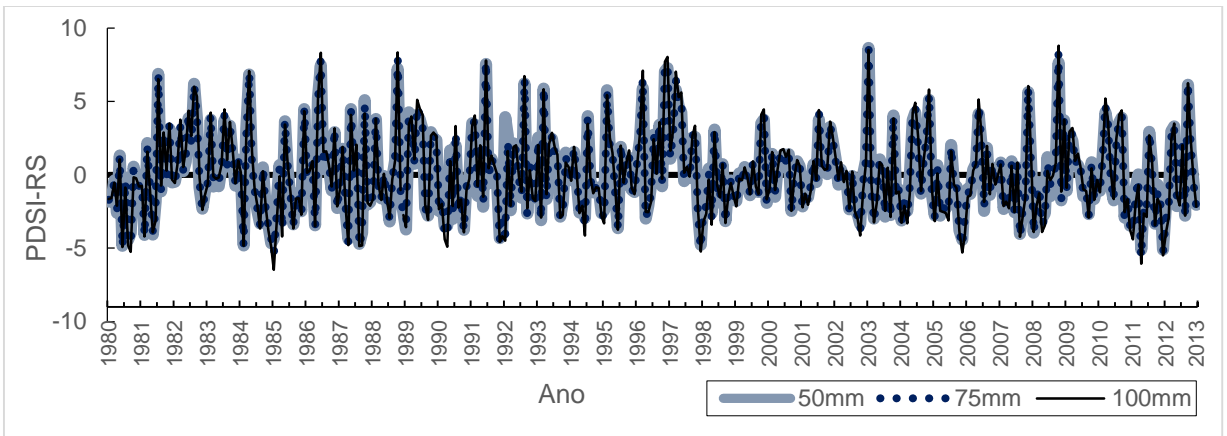


Figura 38- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Jesus/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

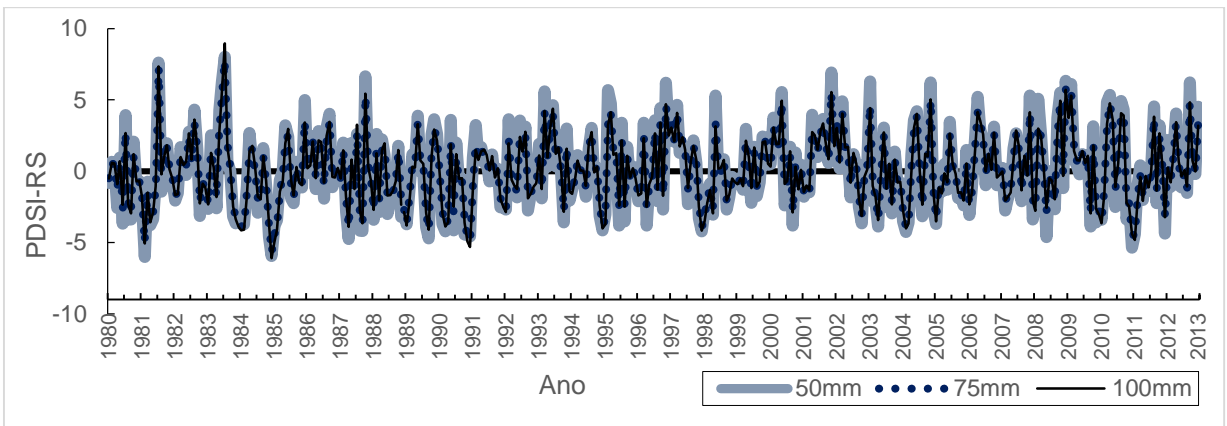


Figura 39- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Retiro do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

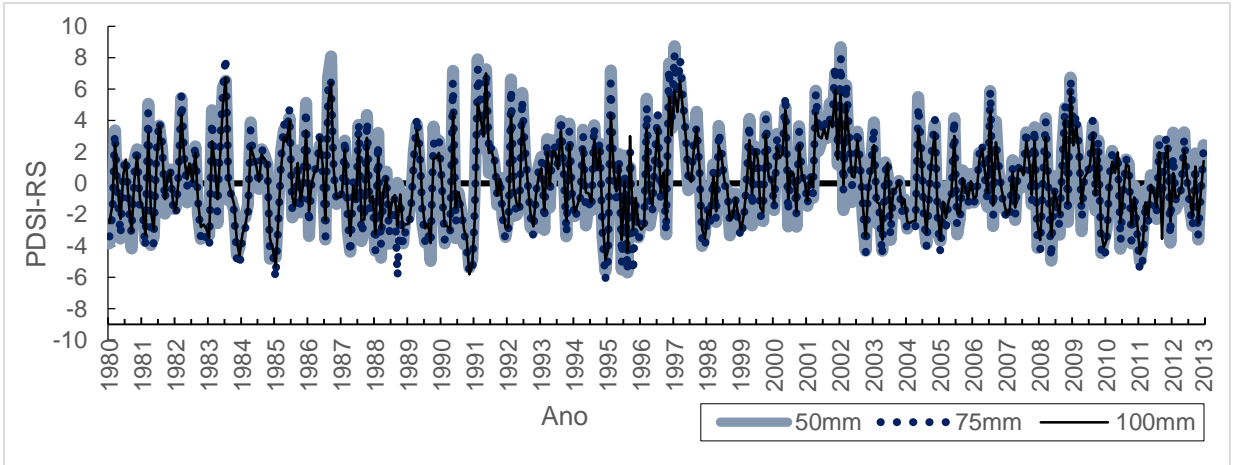


Figura 40- Índice PDSI-RS para a localidade de Cachoeira do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

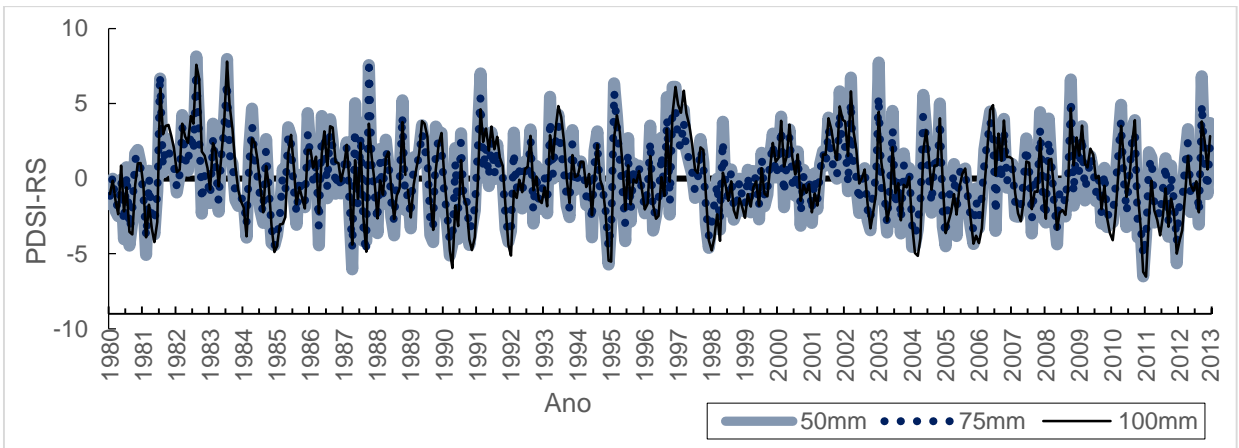


Figura 41- Índice PDSI-RS para a localidade de Caxias do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

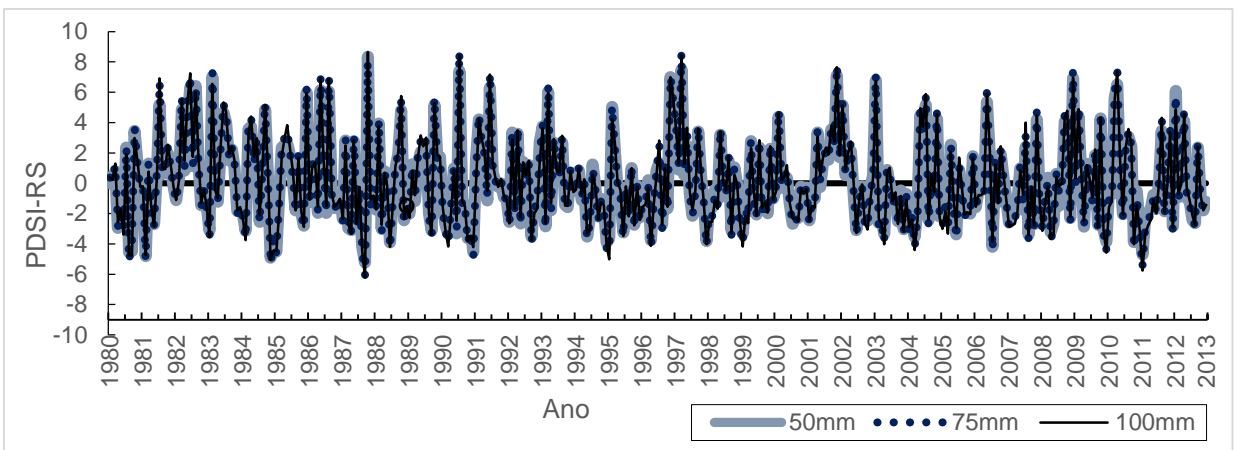


Figura 42- Índice PDSI-RS para a localidade de Cruz Alta/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

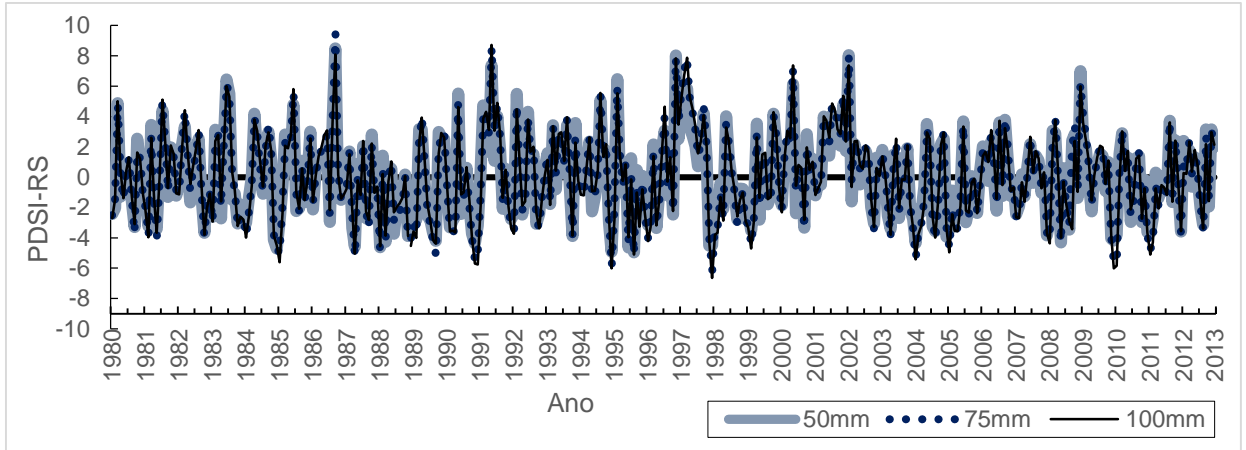


Figura 43- Índice PDSI-RS para a localidade de Encruzilhada do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

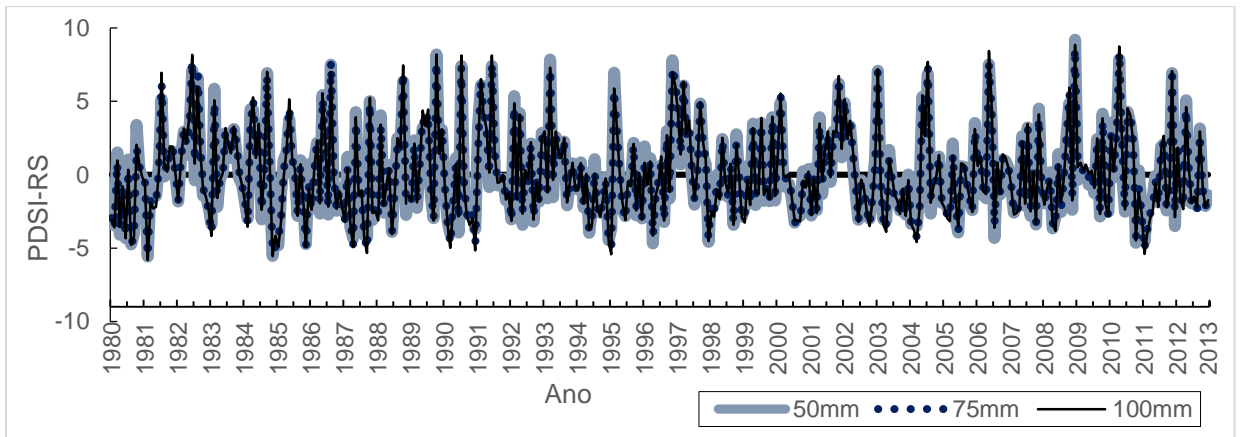


Figura 44- Índice PDSI-RS para a localidade de Ijuí/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

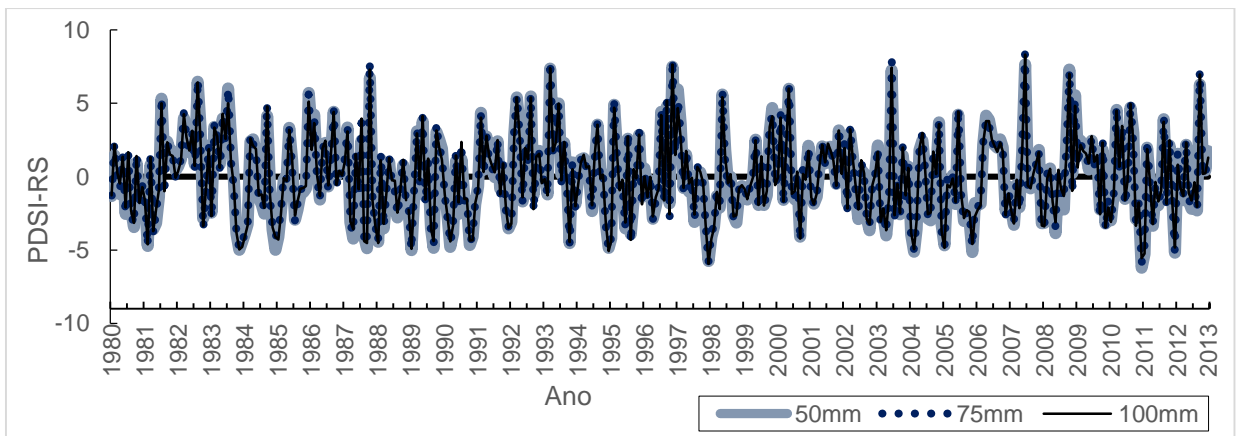


Figura 45- Índice PDSI-RS para a localidade de Osório/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

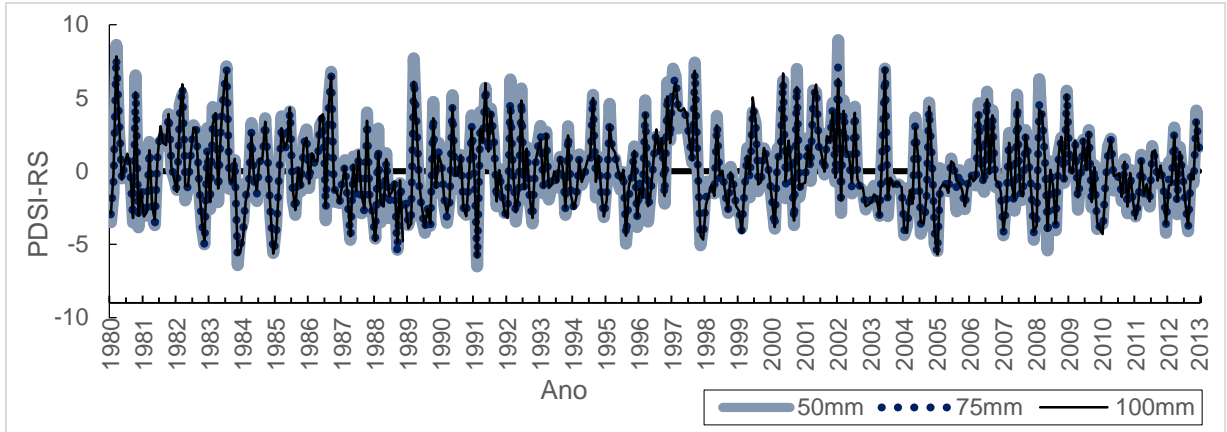


Figura 46- Índice PDSI-RS para a localidade de Pelotas/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

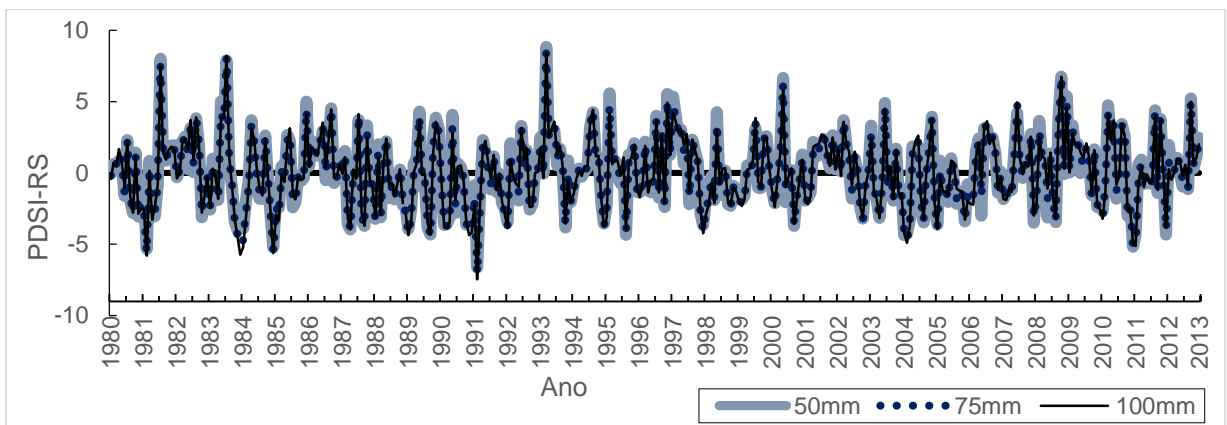


Figura 47- Índice PDSI-RS para a localidade de Porto Alegre/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

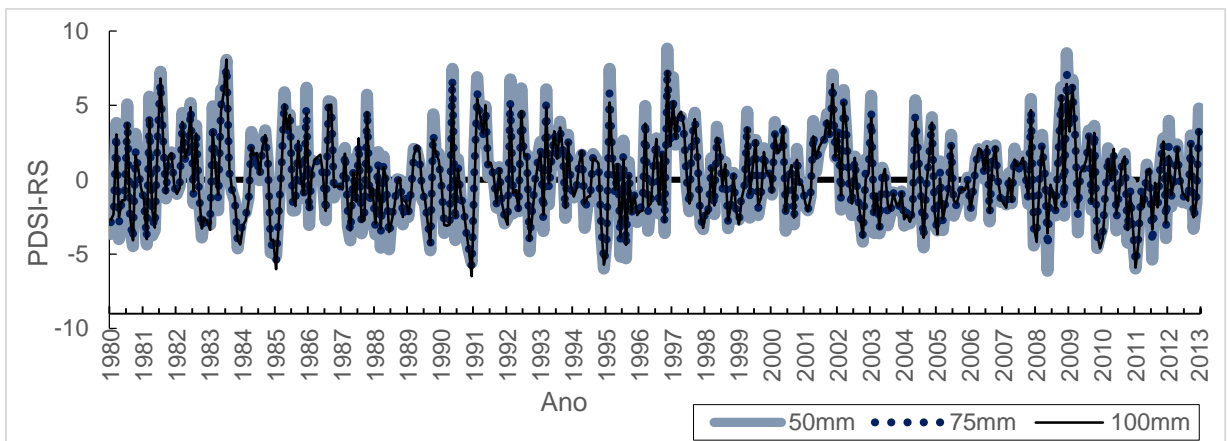


Figura 48- Índice PDSI-RS para a localidade de Restinga Seca/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

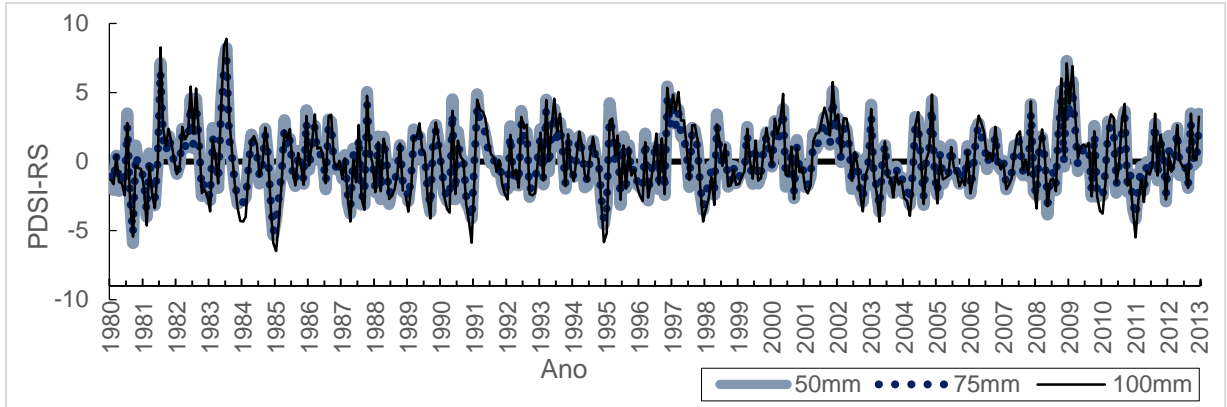


Figura 49- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Cruz do Sul/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

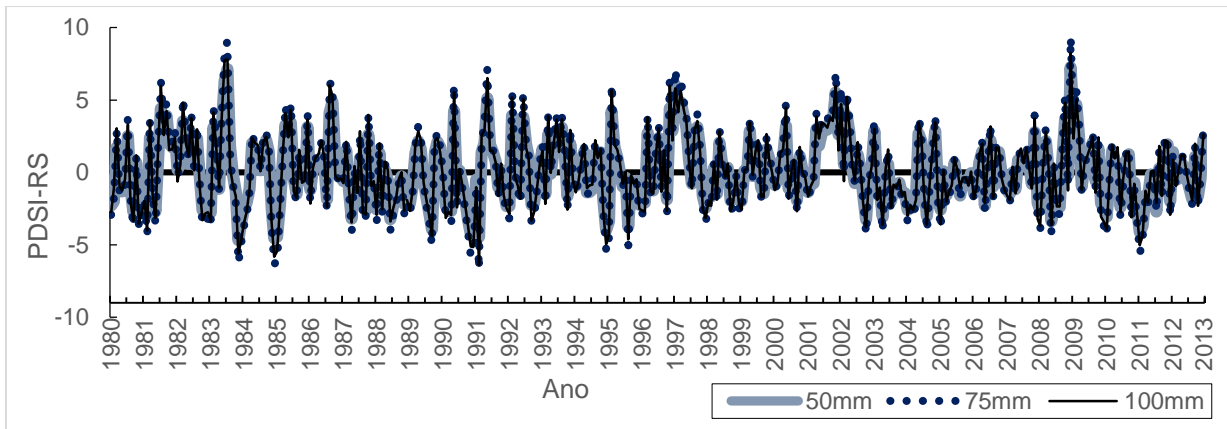


Figura 50- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Maria/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

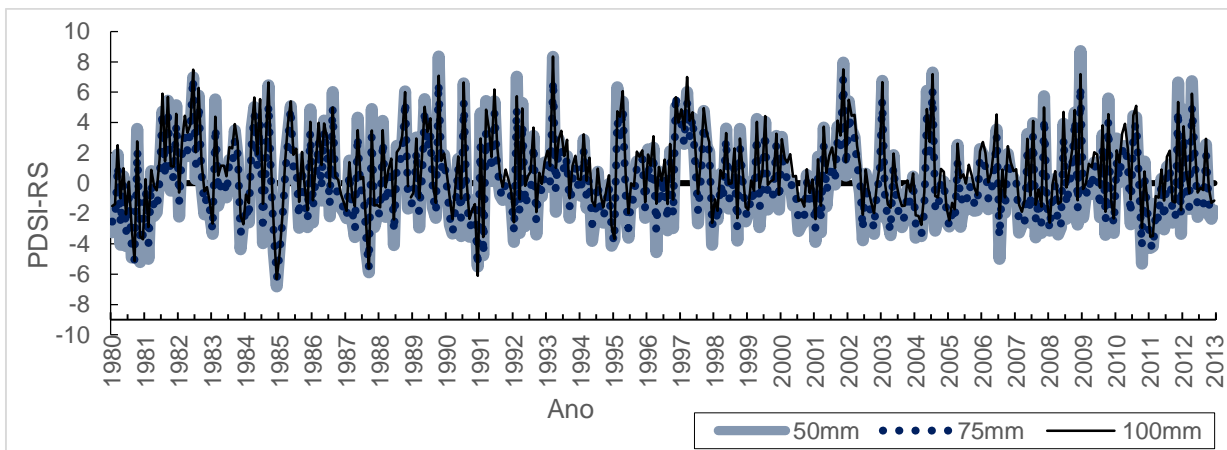


Figura 51- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Rosa/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

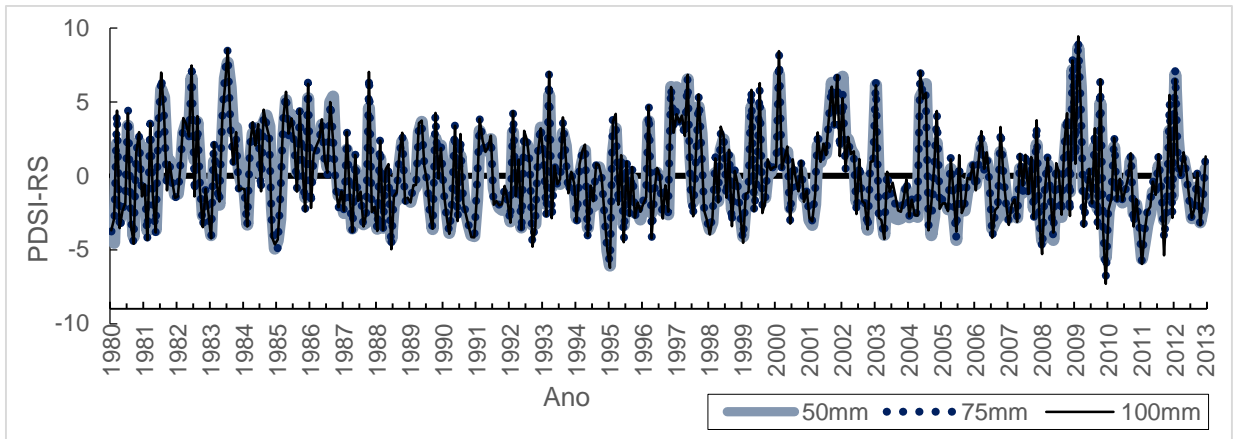


Figura 52 - Índice PDSI-RS para a localidade de Santiago/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

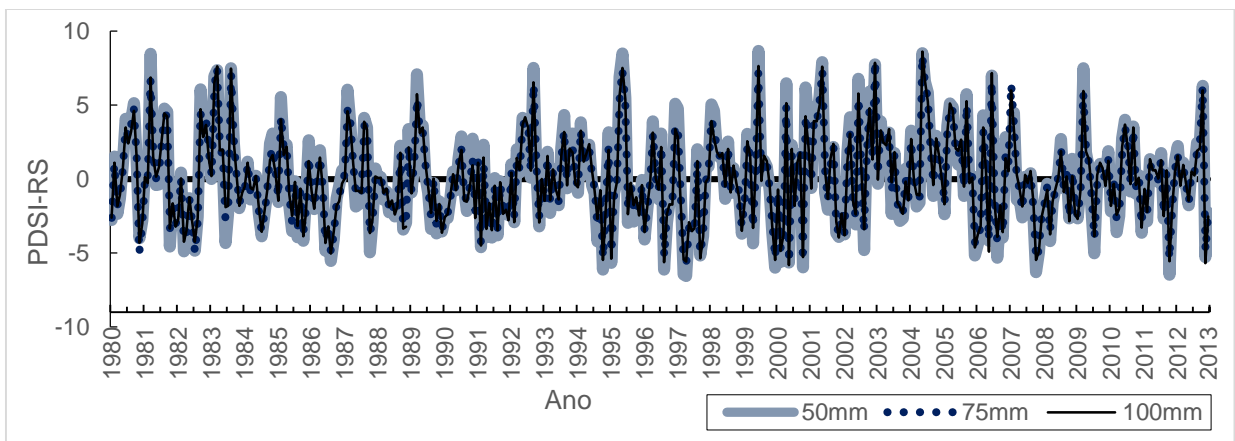


Figura 53- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Vitória do Palmar/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

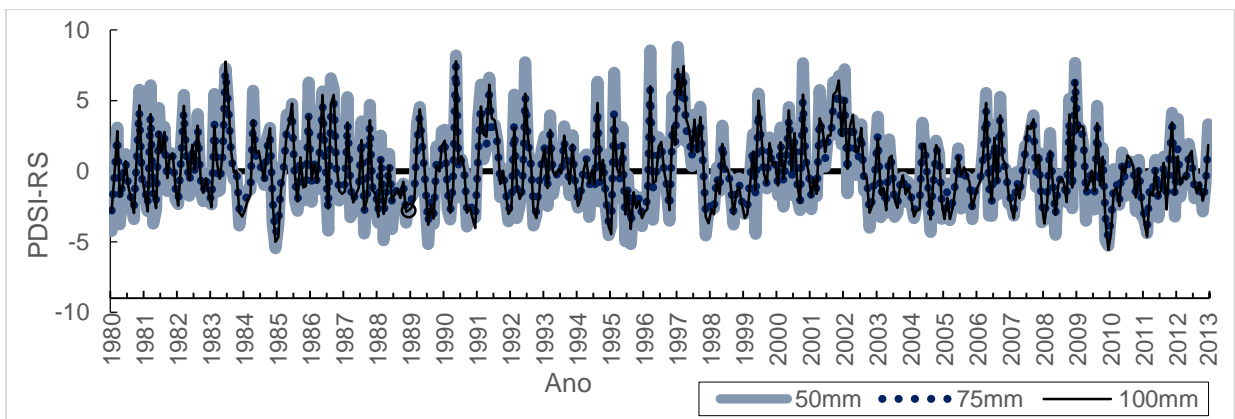


Figura 54- Índice PDSI-RS para a localidade de São Gabriel, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

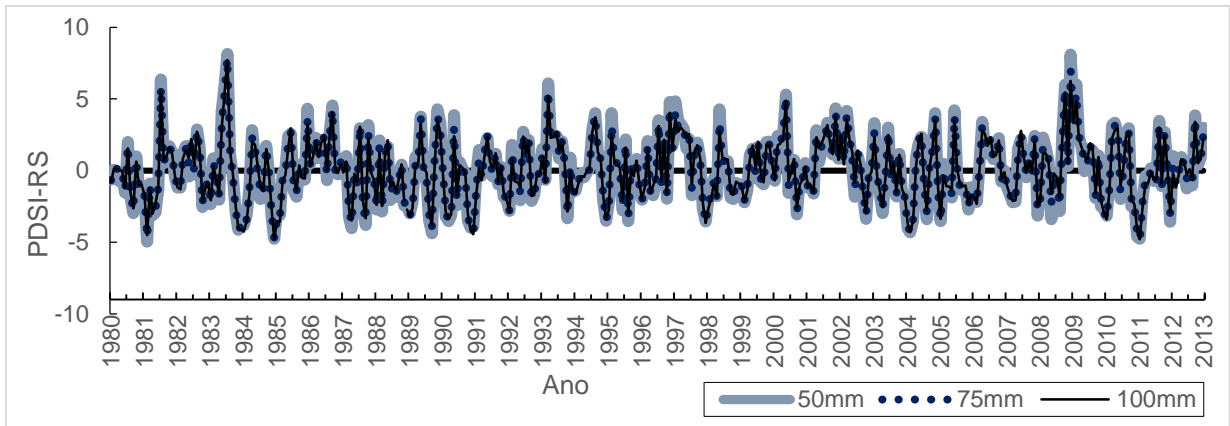


Figura 55- Índice PDSI-RS para a localidade de Triunfo/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

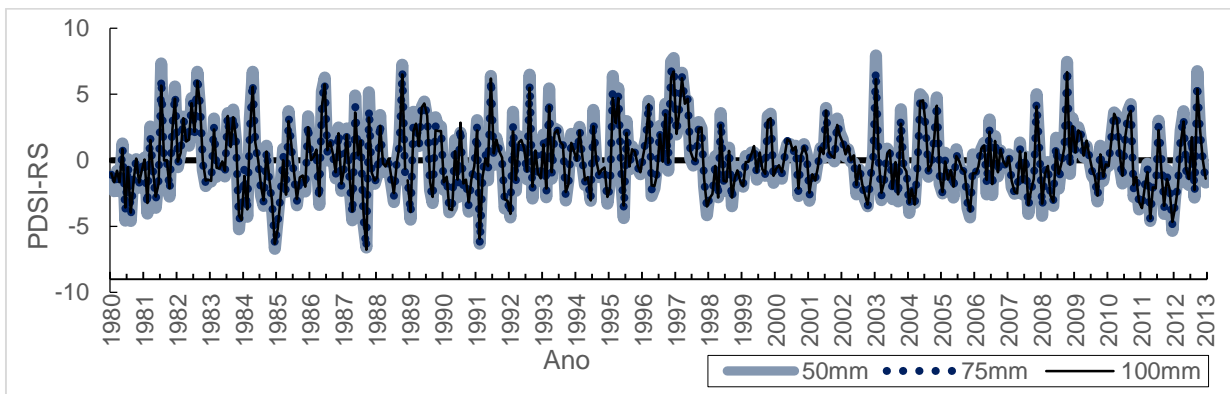


Figura 56- Índice PDSI-RS para a localidade de Vacaria/RS, pela metodologia de Thornthwaite, adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

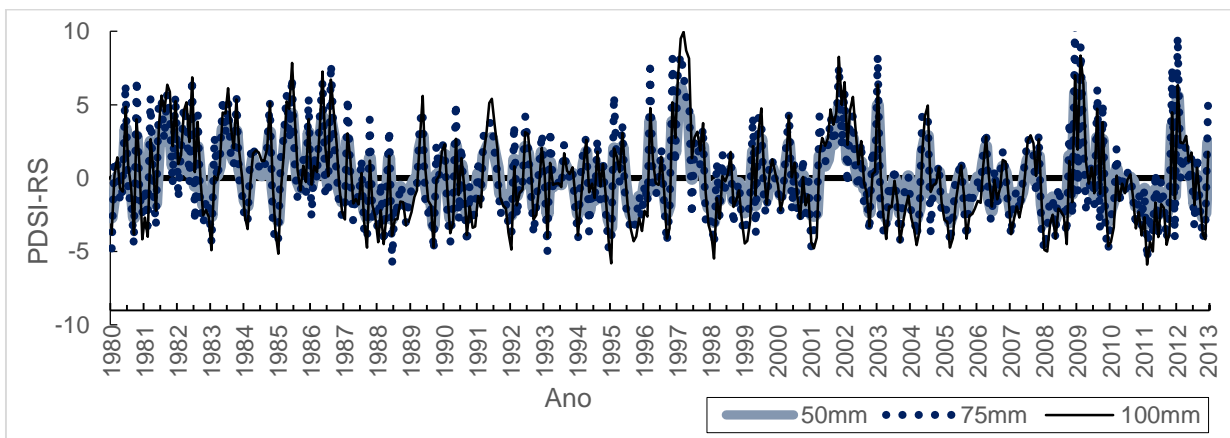


Figura 57- Índice PDSI-RS para a localidade de Alegrete/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

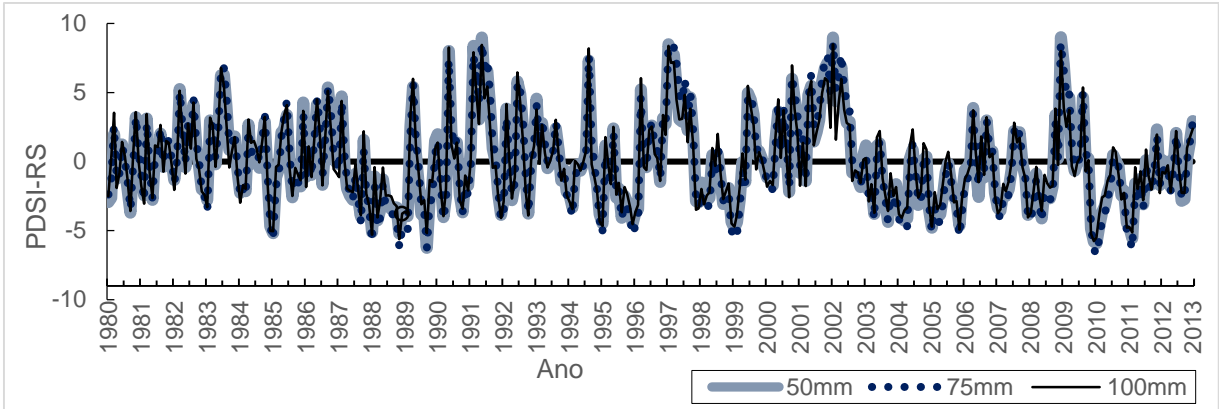


Figura 58- Índice PDSI-RS para a localidade de Bagé/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

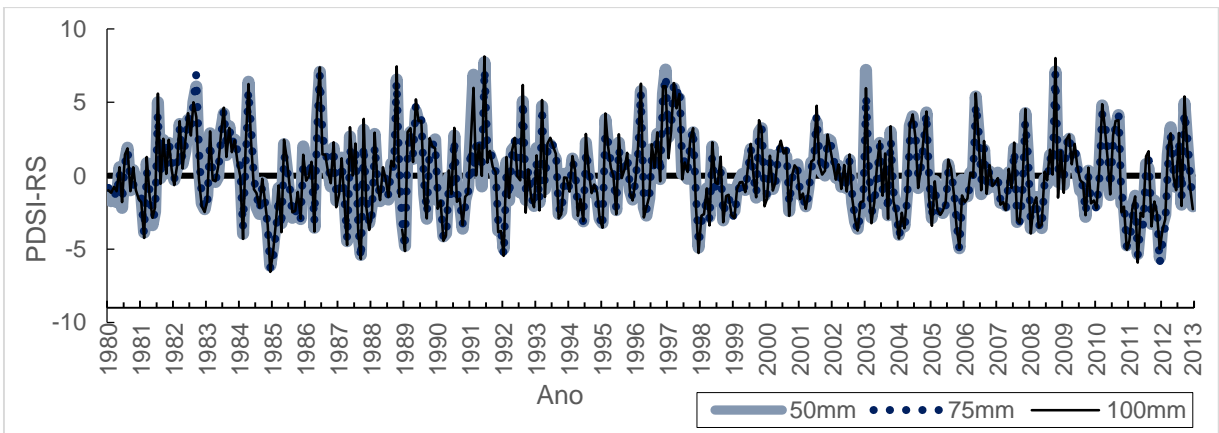


Figura 59- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Jesus/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

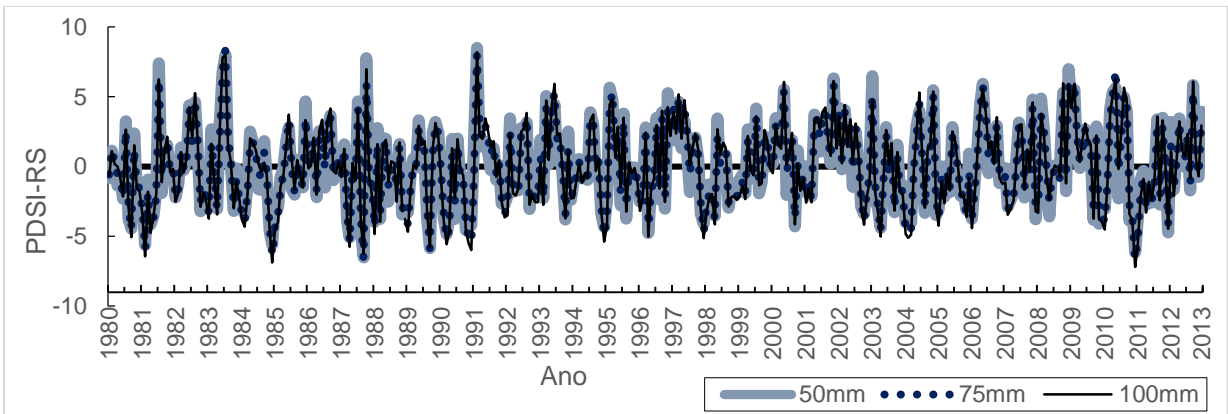


Figura 60- Índice PDSI-RS para a localidade de Bom Retiro do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

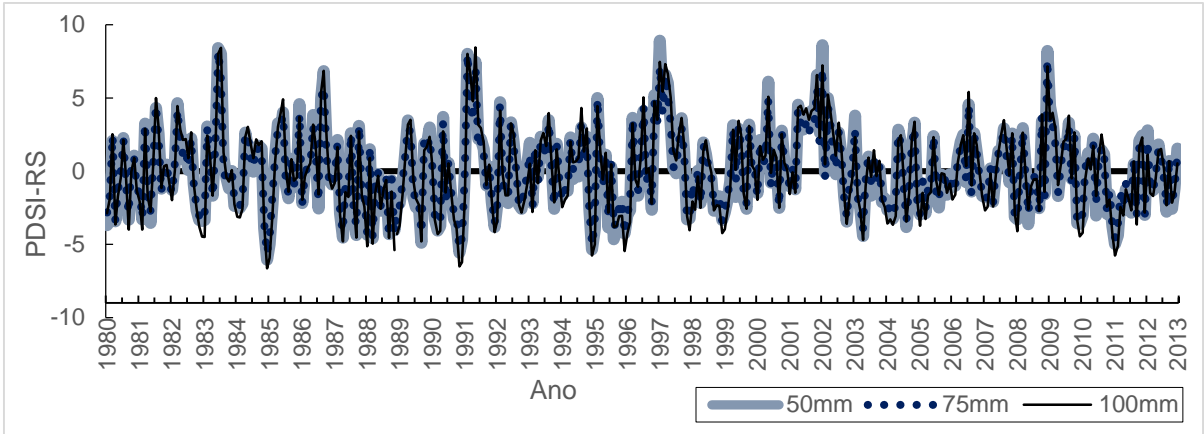


Figura 61- Índice PDSI-RS para a localidade de Cachoeira do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

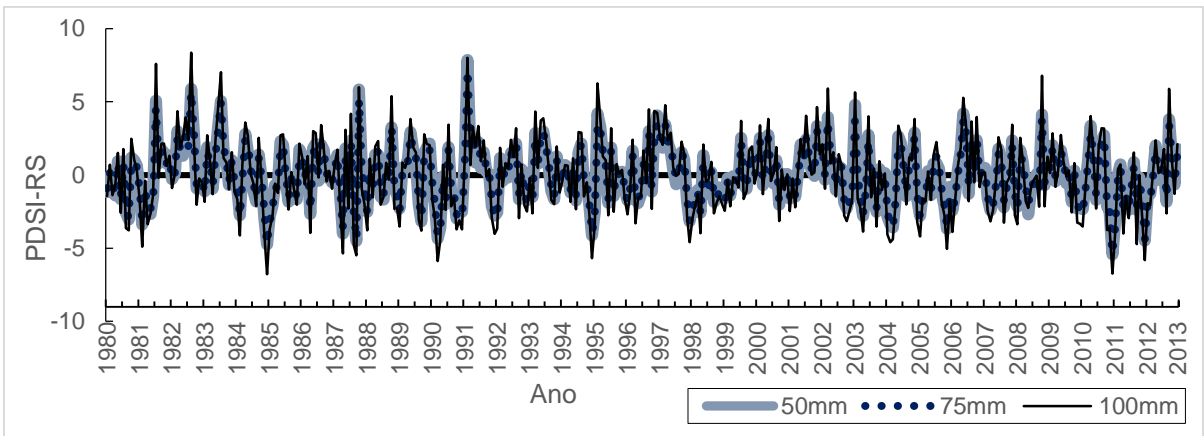


Figura 62- Índice PDSI-RS para a localidade de Caxias do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

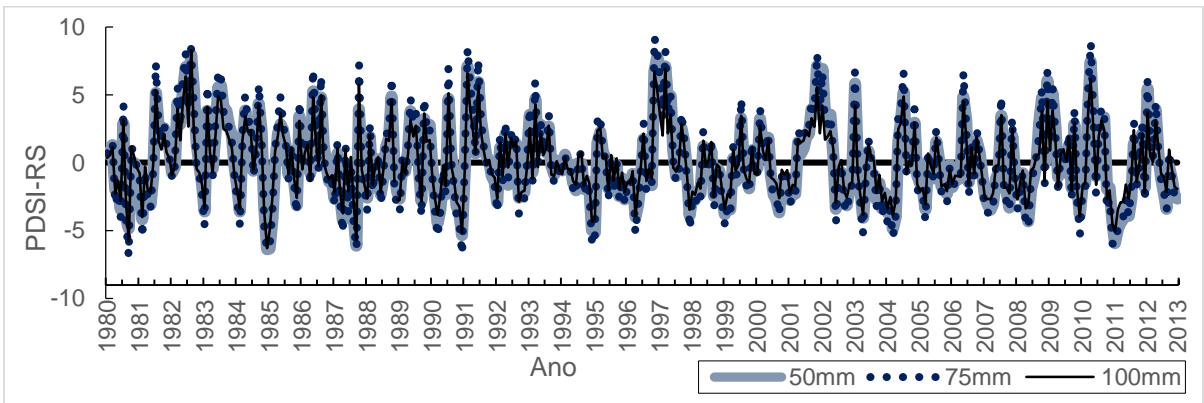


Figura 63- Índice PDSI-RS para a localidade de Cruz Alta/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

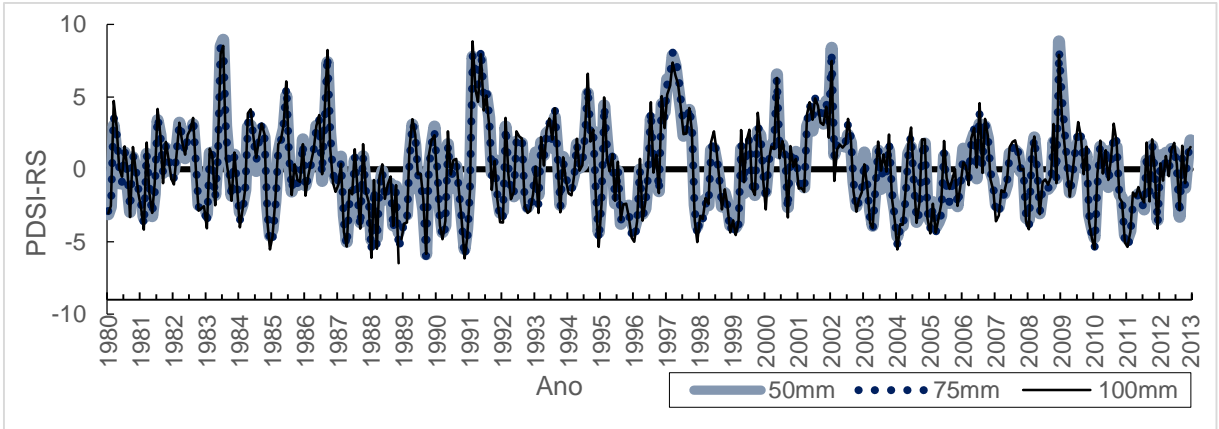


Figura 64- Índice PDSI-RS para a localidade de Encuzilhada do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

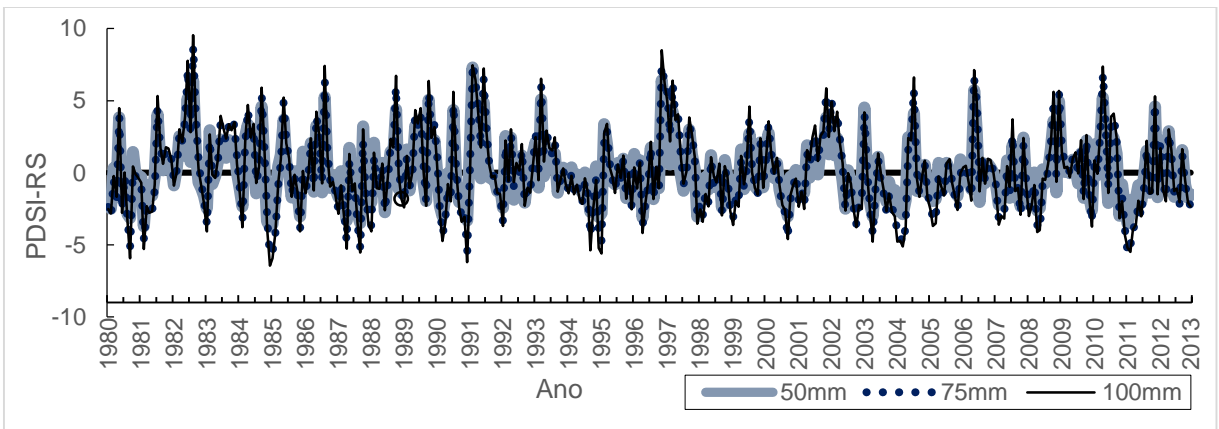


Figura 65 -Índice PDSI-RS para a localidade de Ijuí/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

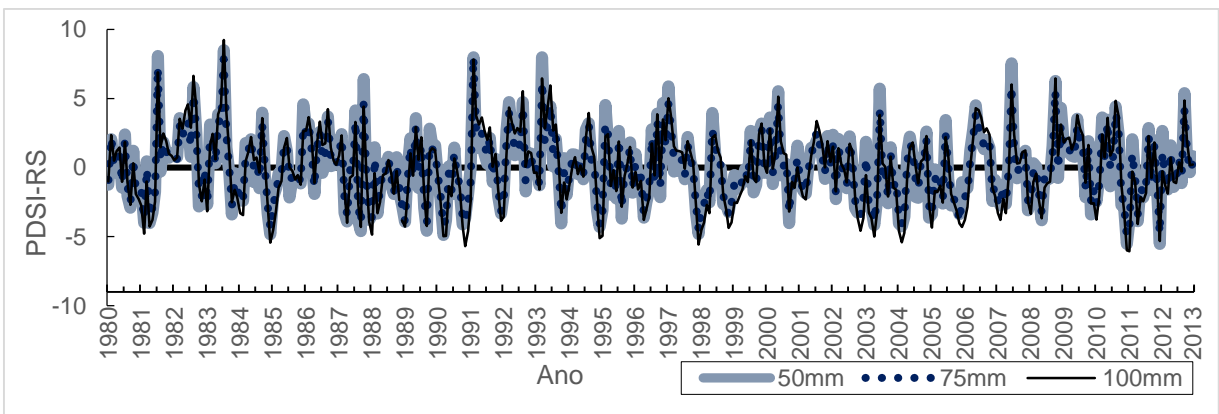


Figura 66- Índice PDSI-RS para a localidade de Osório/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

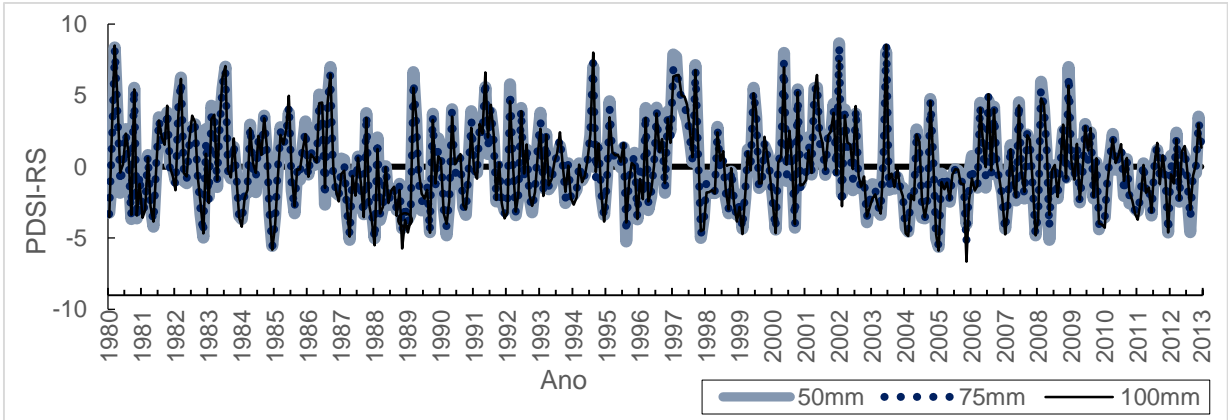


Figura 67- Índice PDSI-RS para a localidade de Pelotas/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

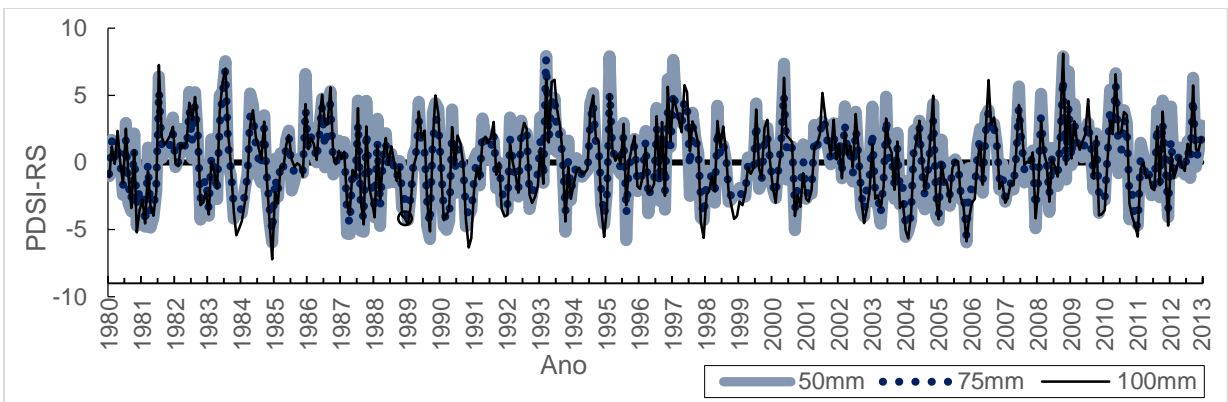


Figura 68 - Índice PDSI-RS para a localidade de Porto Alegre/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

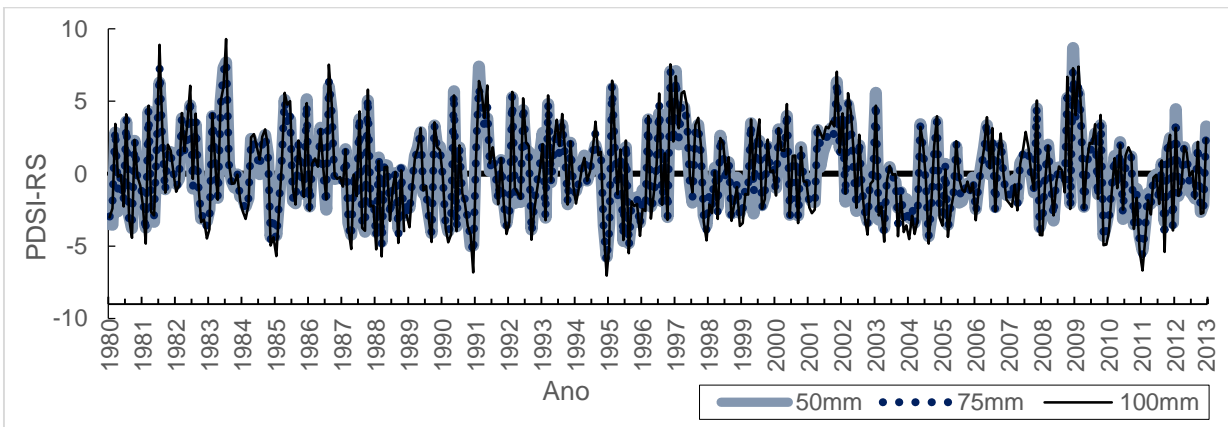


Figura 69- Índice PDSI-RS para a localidade de Restinga Seca/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

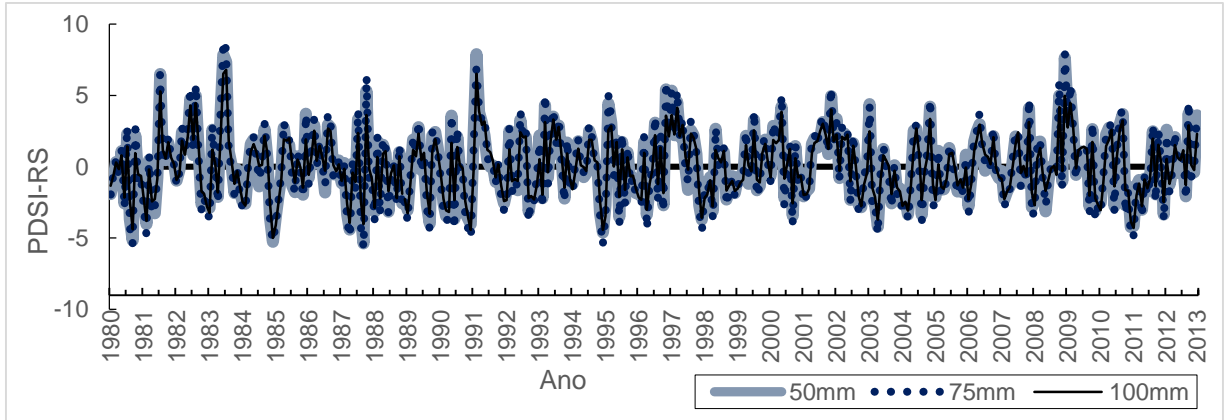


Figura 70- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Cruz do Sul/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

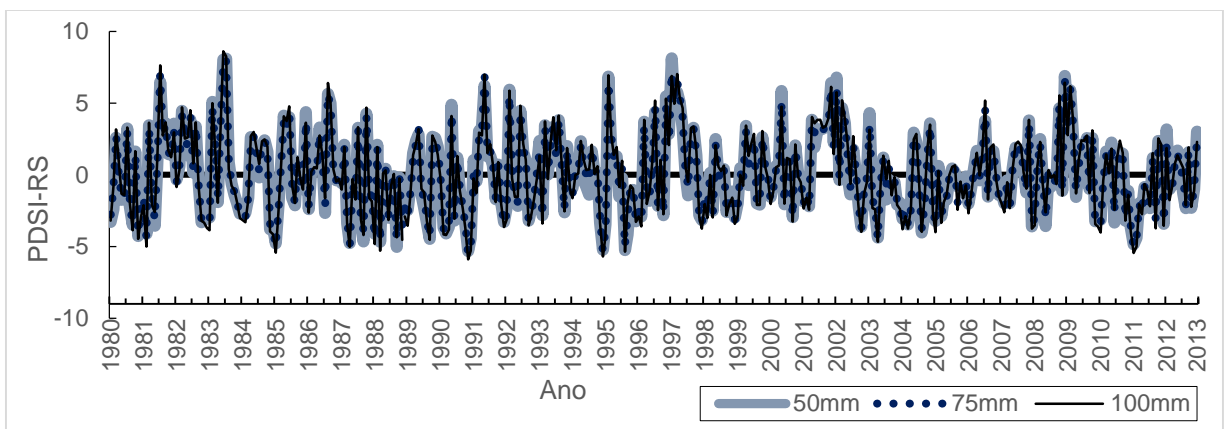


Figura 71- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Maria/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

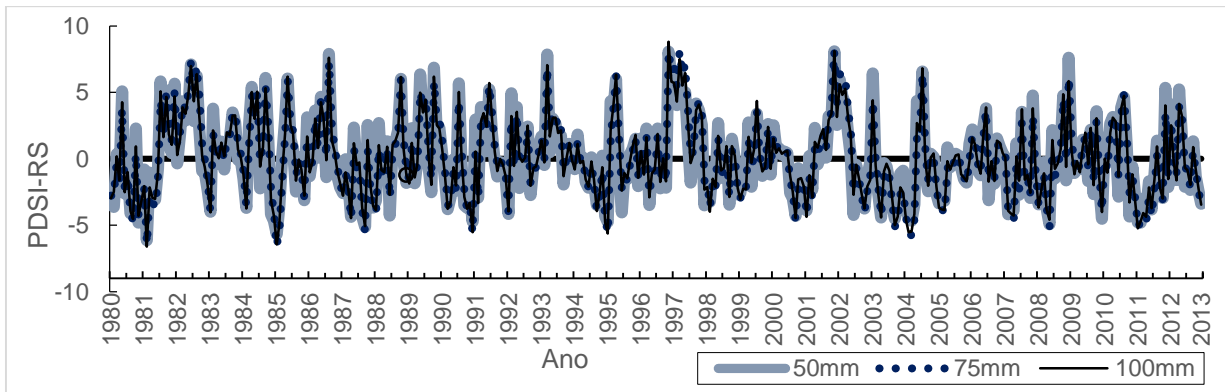


Figura 72- Índice PDSI-RS para a localidade Santa Rosa/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

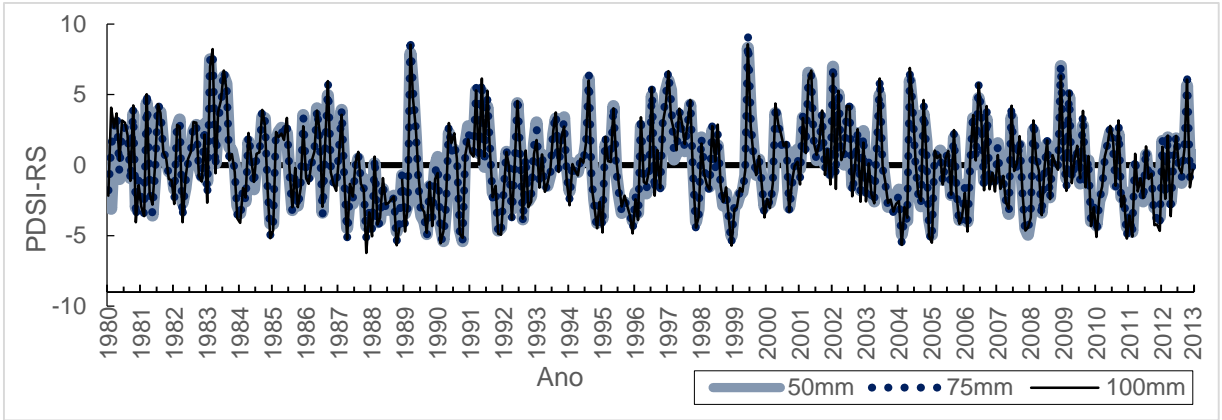


Figura 73- Índice PDSI-RS para a localidade de Santa Vitoria do Palmar/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

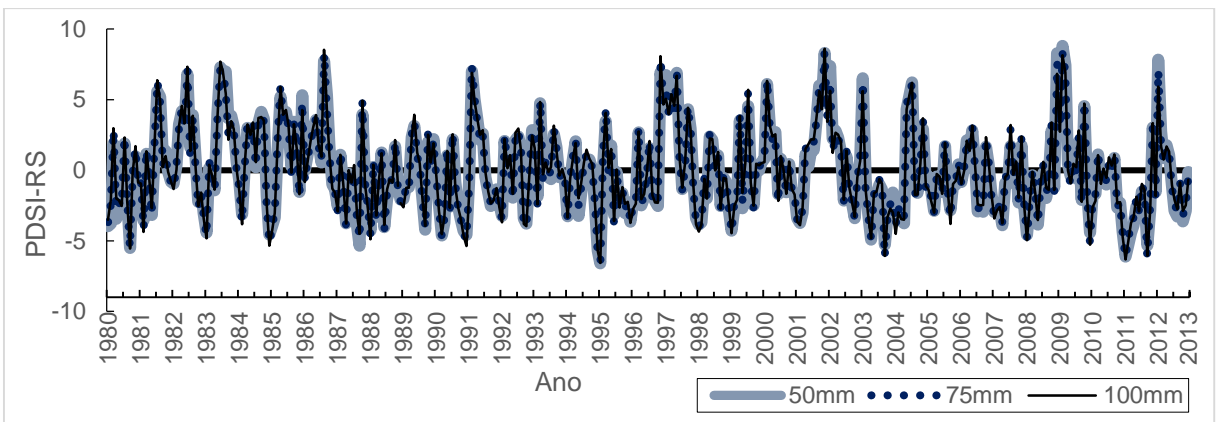


Figura 74- Índice PDSI-RS para a localidade de Santiago/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

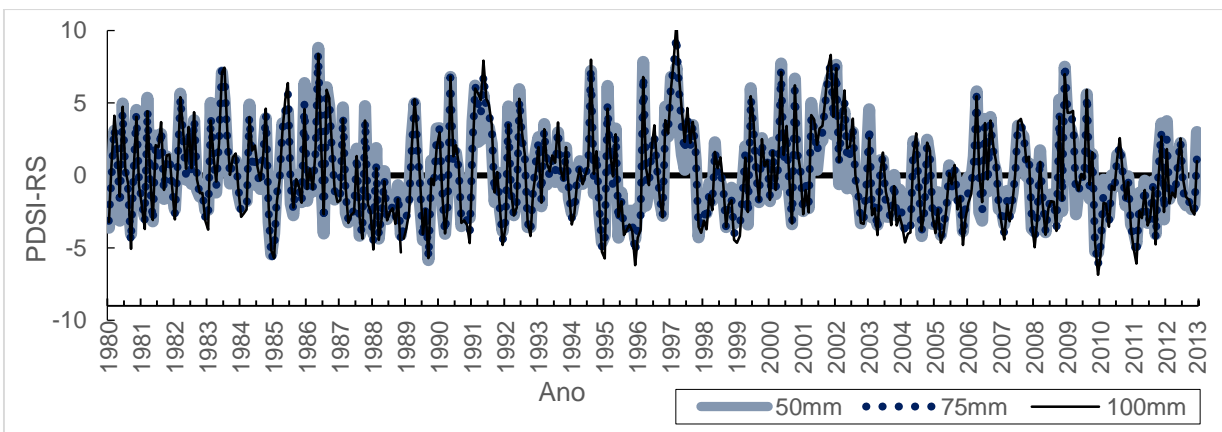


Figura 75- Índice PDSI-RS para a localidade de São Gabriel/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

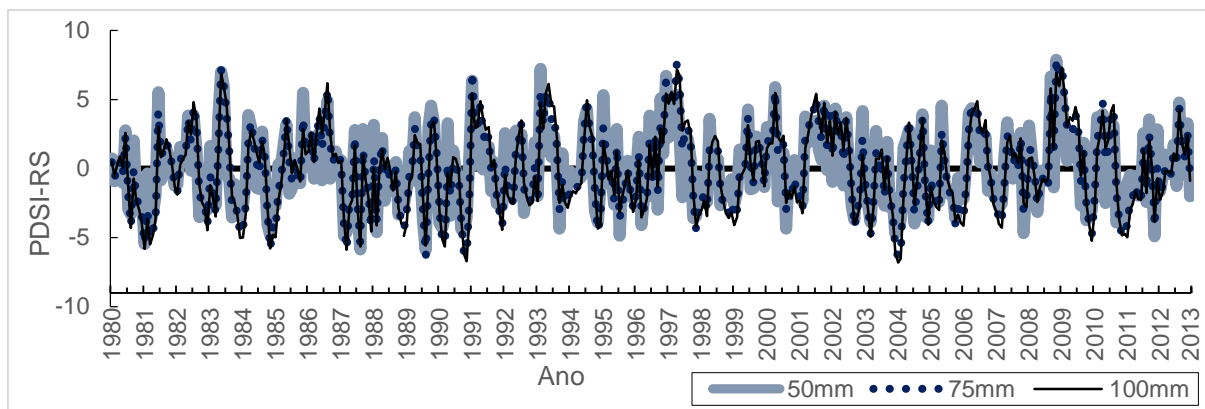


Figura 76- Índice PDSI-RS para a localidade de Triunfo/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

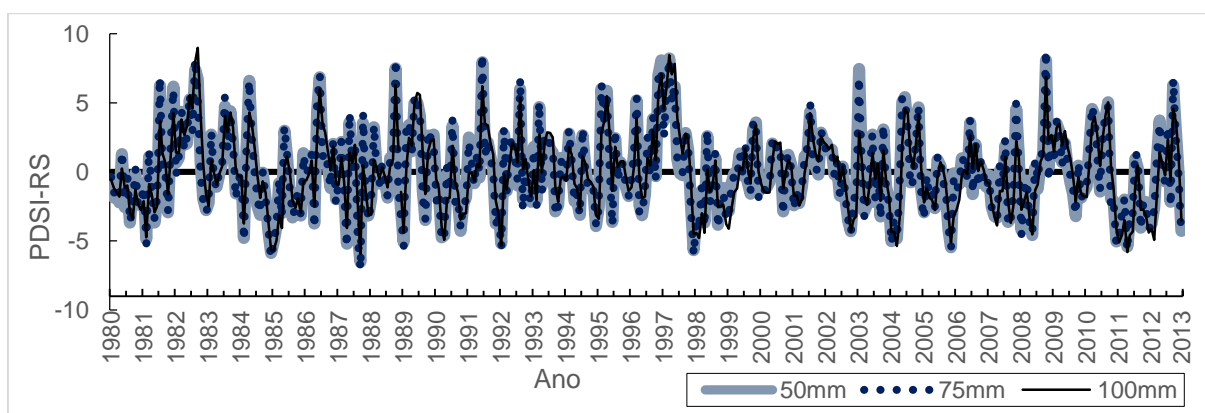


Figura 77- Índice PDSI-RS para a localidade de Vacaria/RS, pela metodologia de Penman-Monteith (FAO), adotando valores de CAD de 50, 75 e 100 mm.

Heim (2002) destaca que ao avaliar o índice proposto por Palmer, deve-se dispor de uma boa base de dados, pois, quanto maiores forem os períodos de calibração, mais consistentes serão os resultados. E que, caso o índice de seca seja modificado, os mesmos devem ser recalculados para manter a consistência dos resultados. Para estudos que fazem uma comparação espacial, o mesmo período de calibração deveria ser utilizado para todas as localidades. Desta forma, o índice PDSI_RS foi modificado e calculado novamente com os novos valores encontrados do fator de caracterização climática.

Na análise das séries temporais para o PDSI modificado para o Rio Grande do Sul (Figuras 36 a 77), denominado PDSI-RS, observa-se um aumento na intensidade dos eventos de seca para a metodologia de Penman-Monteith (FAO) (Figuras 57 a 77), conseqüentemente, um maior número de eventos de seca e severidade, em relação a Thornthwaite. Para a CAD de 100 mm foram detectados maiores eventos de seca severa e extrema, para a maior parte das localidades.

Nas Figuras 40, 46 e 48 observa-se que para os valores de CAD de 50 mm, apresentaram eventos de seca superiores, comparativamente aos encontrados para as CAD's de 75 e 100 mm.

Na Figura 41 observam-se maiores ocorrências de seca para CAD de 50 mm e menores para 75 mm, com ET_0 estimada pela metodologia de Thornthwaite.

Na Figura 62 observa-se que os eventos de seca extrema foram superiores para CAD de 100 mm, comparativamente a de 50 mm. As Figuras 68, 72 e 75 apresentam maiores eventos de seca para a CAD de 50 mm e valores próximos para 75 e 100 mm, quando a ET_0 foi estimada pela metodologia de Penman-Monteith (FAO).

Dai (2011) com o objetivo de comparar e avaliar o desempenho do índice PDSI desenvolvido por Palmer (1965) e o índice autocalibrado SC_PDSI proposto por Wells (2004), utilizou duas metodologias para a estimativa da ET_0 , por Thornthwaite (1948) e Penman-Monteith (FAO). Para período de 1900 a 2008 constatou que a metodologia de Penman-Monteith (FAO) apresentou melhor desempenho na obtenção dos índices de seca.

Na avaliação das séries temporais (Figuras 36 a 77) para o índice PDSI-RS, para as duas estimativas de evapotranspiração, considerando os períodos de ocorrência de seca severa e extrema para o Estado, observou-se que os períodos de 1985, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2011 e 2012 coincidiram com os eventos de La Niña no Rio Grande do Sul.

Matzenauer et al. (2017) avaliaram a relação e o efeito do fenômeno El Niño e La Niña sobre o rendimento de grãos das culturas de soja e de milho no estado do Rio Grande do Sul. Os autores encontraram que nos períodos de 1984/85, 1988/89, 1995/1996, 1999/2000/2001, 2007 e 2011/2012 predominaram os eventos de La Niña. Os resultados encontrados pelos autores corroboraram com os obtidos no presente trabalho, para os eventos de seca ocorridos no estado pelo índice PDSI_RS modificado.

De acordo com Porto (2005), os períodos de ocorrência de La Niña foram nos anos de 1916/1917, 1920/1921, 1924/1925, 1928/1929, 1931/1932, 1938/1939, 1942/1943, 1949/1950, 1954/1955, 1964/1965, 1970/1971, 1973/1974, 1975/1976, 1988/1989, 1995/1996, 1998/1901 e 2003/2004.

Firpo et al. (2012) estudando a variabilidade sazonal de ondas de frio e calor para o Rio Grande do Sul e suas relações com os eventos El Niño e La Niña,

utilizaram dados de 13 estações distribuídas no Estado, entre o período de 1967 e 2005. Os autores observaram que os períodos de ocorrência dos eventos La Niña foram para os anos 1984/1985, 1988, 1989, 1998, 2000 e 2001.

De acordo com os resultados encontrados para o índice PDSI-RS, para os anos de 1985, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009, 2011 e 2012, apresentaram eventos de seca severa e extrema e coincidiram com eventos de La Niña no Estado. Desta forma foram utilizados esses períodos na regressão linear para obtenção do índice PDSI-RS, e assim adaptar as novas classes de seca proposta para o índice modificado.

6.5 Adaptações das classes de seca para o estado do Rio Grande do Sul

Para adaptar o índice PDSI às condições climáticas do Estado foram realizadas regressões lineares simples, entre os valores de Z negativos, que indicam períodos de seca e o número de meses que ocorreram tais eventos. Deste modo obtém-se uma nova regressão linear, com os valores de todas as localidades, que foram calibradas, com os novos valores encontrados do fator de caracterização climática (K), a fim de observar se os períodos apresentavam coerência entre si. O valor do coeficiente de determinação obtido pela regressão linear foi de (R^2) foi de 0,9161, que indica uma boa coerência entre os períodos analisados (Figura 78).

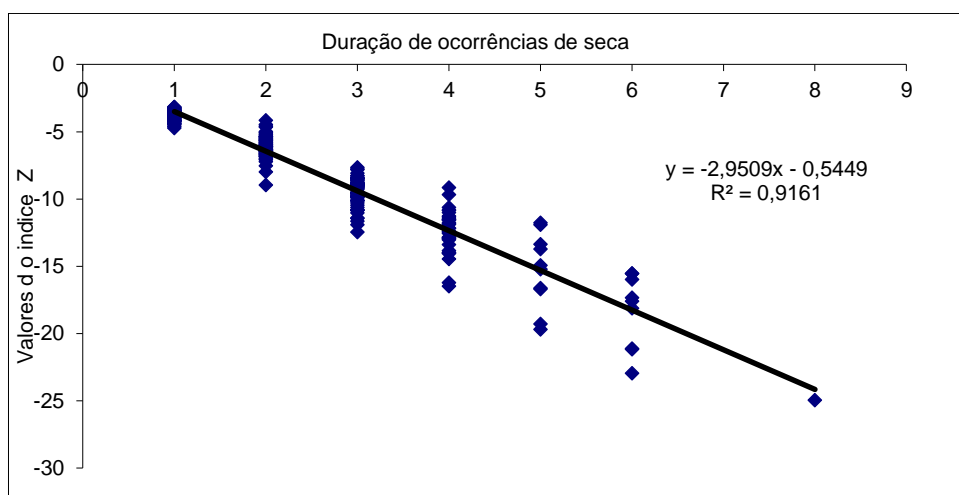


Figura 78- Regressão linear de todos os períodos de ocorrência de seca.

Na Figura 79 são apresentados os valores negativos do índice de umidade (Z) acumulados, e os períodos de duração de ocorrência de seca. Para as regressões lineares foram considerados valores médios, maiores e menores de seca.

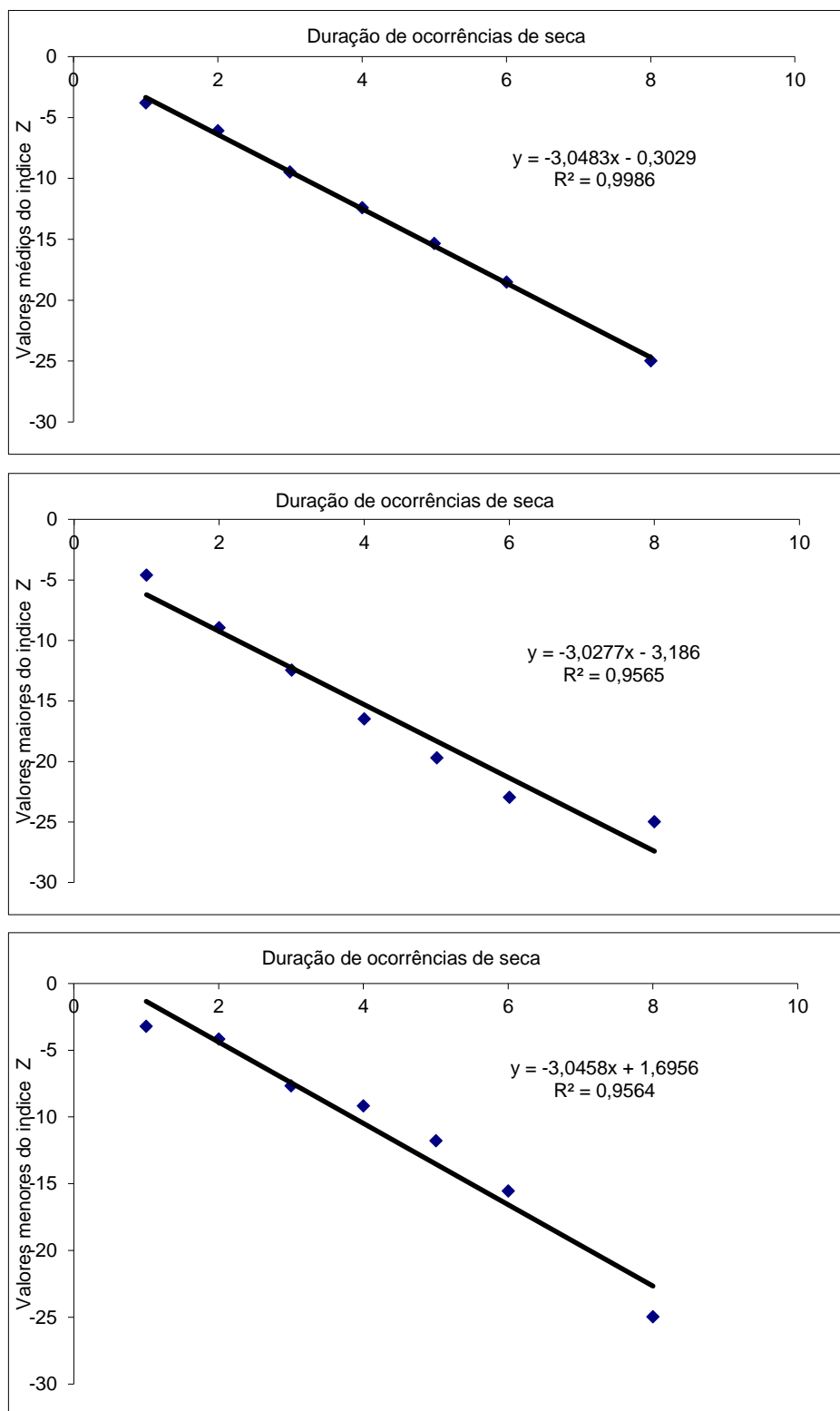


Figura 79- Regressões lineares para as ocorrências de seca para os períodos com valores médios, menos negativos e mais negativos

A análise foi realizada a fim de observar a subjetividade da seleção dos períodos de ocorrência de seca, durante o processo de calibração, já que a seleção dos períodos pode variar de acordo com os eventos de seca que são considerados.

Observa-se que considerando as médias dos valores acumulados do índice de umidade (Z) e o seu período de duração obteve-se um coeficiente de determinação de (R^2) 0,9986, ou seja, melhor ajuste (Figura 79).

Para as regressões lineares que utilizaram valores maiores e menores, os valores de R^2 foram similares.

Na Tabela 10 são apresentados a duração dos períodos de ocorrência de seca e os valores de Z acumulados, utilizados para obter a regressão linear simples do índice PDSI-RS.

Tabela 10- Valores de Z acumulados e duração dos períodos de ocorrências

1	2	3	4	5	6	8
-3,5	-7,2	-9,6	-14,5	-16,7	-21,1	-25,0
-4,4	-5,6	-11,4	-12,5	-19,3	-16,0	
-4,5	-5,7	-9,0	-14,0	-11,8	-15,6	
-3,6	-6,7	-8,6	-10,6	-14,9	-17,6	
-4,3	-6,8	-9,0	-11,8	-11,9	-21,2	
-3,4	-7,0	-10,5	-11,5	-13,4	-18,1	
-3,6	-5,0	-9,5	-14,0	-15,2	-15,5	
-3,2	-4,2	-8,8	-13,0	-13,7	-23,0	
-4,2	-4,7	-8,4	-9,2	-19,7		
-3,7	-6,4	-9,7	-12,4	-16,6		
-3,5	-7,0	-9,0	-12,9			
-4,2	-6,5	-9,0	-12,2			
-4,0	-5,7	-9,1	-11,5			
-3,6	-9,0	-10,6	-11,6			
-4,7	-8,0	-12,5	-12,2			
-3,7	-6,8	-8,4	-12,8			
-4,3	-6,7	-8,8	-11,8			
-3,6	-6,5	-8,4	-14,0			
-3,7	-5,8	-7,8	-11,5			
-4,1	-5,1	-9,0	-10,8			
-3,6	-5,3	-8,9	-13,0			
-3,3	-5,4	-8,9	-16,2			
-3,6	-5,9	-8,9	-11,4			
-3,6	-6,9	-8,9	-13,4			
-4,0	-5,4	-10,1	-13,8			
-3,6	-6,4	-9,3	-12,5			
-3,2	-6,5	-9,2	-10,8			
-3,5	-5,6	-10,8	-12,9			
-3,6	-5,6	-9,9	-11,3			
-3,6	-6,3	-9,7	-11,0			
-3,4	-6,3	-9,0	-11,9			
-3,9	-7,1	-9,9	-9,7			
-3,9	-6,7	-8,5	-16,5			
-3,8	-6,6	-9,0				

continua

Tabela 10- Valores de Z acumulados e duração dos períodos de ocorrências

1	2	3	4	5	6	7
-3,5	-7,5	-11,4				
-4,2	-6,6	-9,8				
-4,0	-6,0	-10,8				
-3,6	-6,0	-10,8				
-3,3	-5,7	-10,1				
-3,3	-6,4	-10,1				
-3,5	-6,3	-7,7				
-4,2	-6,0	-8,9				
-4,4	-5,3	-9,8				
-4,1	-5,8	-7,8				
-3,9	-5,9	-10,3				
-3,4	-5,1	-11,9				
-4,2	-5,4	-11,0				
-3,7	-6,1	-11,7				
-4,4	-6,4	-8,9				
-3,3	-6,2	-10,8				
-3,2	-6,3	-9,2				
-3,3	-6,1	-9,2				
-4,3	-5,8	-8,6				
-3,8	-6,1	-9,0				
-3,8	-6,0	-9,5				
-4,6	-6,3	-8,1				
-4,1	-6,1	-8,3				
	-6,4	-8,8				
	-5,5	-8,3				
	-4,5	-8,5				
	-4,6	-9,6				
	-5,5	-9,5				
	-6,1	-8,5				
	-5,2	-10,1				
	-6,1					
	-5,4					

Para a equação final do índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o Estado, obteve-se:

$$X_i = (Z_i / 0,87) + 0,1559 * X_{i-1} \quad (46)$$

Após obter o valor da equação foram testados os limites (-0,5, -1,0 e -1,5) para determinar o valor de início de uma seca. Nas Equações 47, 48 e 49 são apresentados os valores encontrados, com o índice de umidade (Z) que é igual ao valor do índice de umidade esperado (Z_{esp}).

Para o valor de $-0,5$:

$$Z_i = -0,13 * X_{i-1} - 0,43 \quad (47)$$

Para o valor de $-1,0$:

$$Z_i = -0,13 * X_{i-1} - 0,87 \quad (48)$$

Para o valor de $-1,5$:

$$Z_i = -0,13 * X_{i-1} - 1,3 \quad (49)$$

Os valores ($-0,5$, $-1,0$ e $-1,5$), foram testados como valores limites para indicar o início de ocorrência de uma seca. Após encontrar os valores do índice de umidade esperado (Z_{esp}), foram calculados os valores de anomalia hídrica esperada (d_{esp}), a precipitação esperada (P_{esp}), de acordo com as Equações 37 e 38, respectivamente.

De acordo com a metodologia proposta por Blain (2005) foi realizada uma comparação entre a relação ETR/ET_0 , obtida pelo balanço hídrico mensal, quando o valor da precipitação ocorrida fosse igual a precipitação esperada (P_{esp}). A comparação foi realizada por meio do coeficiente de determinação (r^2) e do índice de concordância de Willmott (d), cujos valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11- Valores do coeficiente de determinação (r^2) e Índice de Willmott (d) para três classes de seca, para algumas localidades nas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião	Localidade	-0,5		-1,0		-1,5	
		r^2	d	r^2	d	r^2	d
Centro Ocidental	Santa Maria	0,36	0,59	0,37	0,59	0,36	0,60
	Restinga Seca	0,34	0,57	0,34	0,58	0,34	0,58
	Santiago	0,42	0,64	0,43	0,64	0,43	0,64
Centro Oriental	Santa Cruz do Sul	0,38	0,61	0,38	0,61	0,38	0,61
	Cachoeira do Sul	0,34	0,58	0,34	0,58	0,34	0,58
	Bom Retiro do Sul	0,41	0,64	0,42	0,64	0,42	0,64
Metropolitana	Osório	0,49	0,69	0,49	0,69	0,49	0,69
	Porto Alegre	0,47	0,67	0,47	0,68	0,46	0,68
	Triunfo	0,39	0,61	0,39	0,62	0,39	0,62
Nordeste	Caxias do Sul	0,71	0,83	0,70	0,83	0,69	0,82
	Vacaria	0,50	0,70	0,50	0,70	0,50	0,70
	Bom Jesus	0,54	0,74	0,54	0,74	0,55	0,74

continua

Tabela 11- Valores do coeficiente de determinação (r^2) e Índice de Willmott (d) para três classes de seca, para algumas localidades nas mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul

Mesorregião	Localidade	-0,5		-1,0		-1,5	
		r^2	d	r^2	d	r^2	d
Noroeste	Cruz Alta	0,40	0,63	0,41	0,63	0,41	0,63
	Ijuí	0,49	0,69	0,49	0,69	0,49	0,69
	Santa Rosa	0,52	0,71	0,52	0,71	0,52	0,71
Sudeste	Pelotas	0,50	0,70	0,50	0,70	0,50	0,70
	Santa Vitória do Palmar	0,41	0,61	0,43	0,61	0,41	0,61
	Encruzilhada do Sul	0,46	0,65	0,46	0,65	0,46	0,65
Sudoeste	Alegrete	0,64	0,79	0,64	0,79	0,64	0,79
	Bagé	0,54	0,73	0,55	0,73	0,54	0,73
	São Gabriel	0,44	0,66	0,44	0,66	0,44	0,66

Os resultados obtidos demonstraram pequena diferença entre si, sendo que as localidades de Santa Cruz do Sul, Cachoeira do Sul, Osório, Vacaria, Ijuí, Santa Rosa, Pelotas, Encruzilhada do Sul, Alegrete e São Gabriel apresentaram os mesmos valores para o r^2 e d, considerando as classes de seca de -0,5, -1,0 e -1,5.

Para as localidades de Cruz Alta, Restinga Seca, Santiago, Bom Retiro do Sul e Triunfo, os valores limites de -1,0 e -1,5 foram iguais.

Santa Maria apresentou o valor do coeficiente de determinação maior para o valor limite de -1,0 e índice de Willmott maior para -1,5. Para a localidade de Bom Jesus, o valor do coeficiente de determinação foi maior para o valor limite de -1,5.

Santa Vitória do Palmar, Bagé e Porto Alegre apresentaram os coeficientes de determinação maiores para o valor limite de -1,0.

Observa-se que os resultados obtidos para o valor de -1,0 foram superiores para o coeficiente de determinação e índice de Willmott, em relação aos valores de -0,5 e -1,5.

Blain (2005) analisou os valores limites de -0,5 e de -1,0 e encontrou que o valor limite de -0,5 apresentou resultados satisfatórios, para os coeficientes de determinação e índice de concordância de Willmott, em todas as localidades e em todos os períodos analisados para o estado de São Paulo, diferentemente do que ocorreu para o presente trabalho.

A diferença dos valores encontrados pode estar associada a diferença do clima de São Paulo e do Rio Grande do Sul, principalmente com relação a distribuição da

precipitação ao longo do ano. Este fato corrobora com resultados encontrados por Blain et al. (2009), que avaliaram a variabilidade amostral em séries mensais de precipitação pluvial na localidade de Campinas/SP e Pelotas/RS, para uma possível aplicação na elaboração do zoneamento agrícola. Os autores verificaram que ao contrário do observado na região de Campinas/SP, que possui uma estação seca definida, de maio a agosto, na região de Pelotas/RS, as chuvas são distribuídas de forma semelhante ao longo do ano.

Nas Figuras 80, 81 e 82 são apresentadas as ocorrências dos eventos nas mesorregiões calibradas com os novos valores do fator de caracterização climática para o RS, de acordo com a intensidade e o grau de severidade da seca.

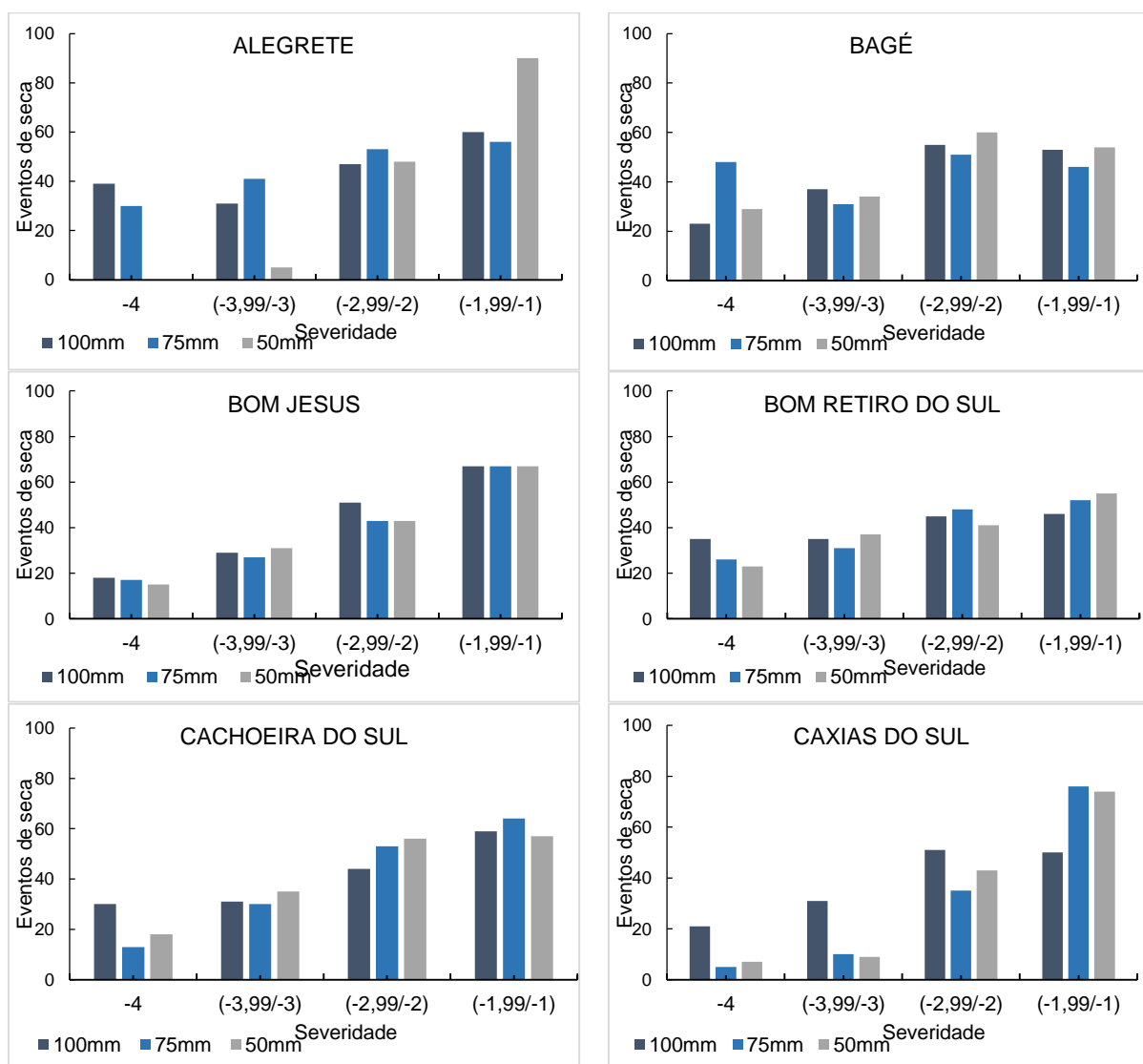


Figura 80- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Alegrete, Bagé, Bom Jesus, Bom Retiro do Sul, Cachoeira do Sul e Caxias do Sul.

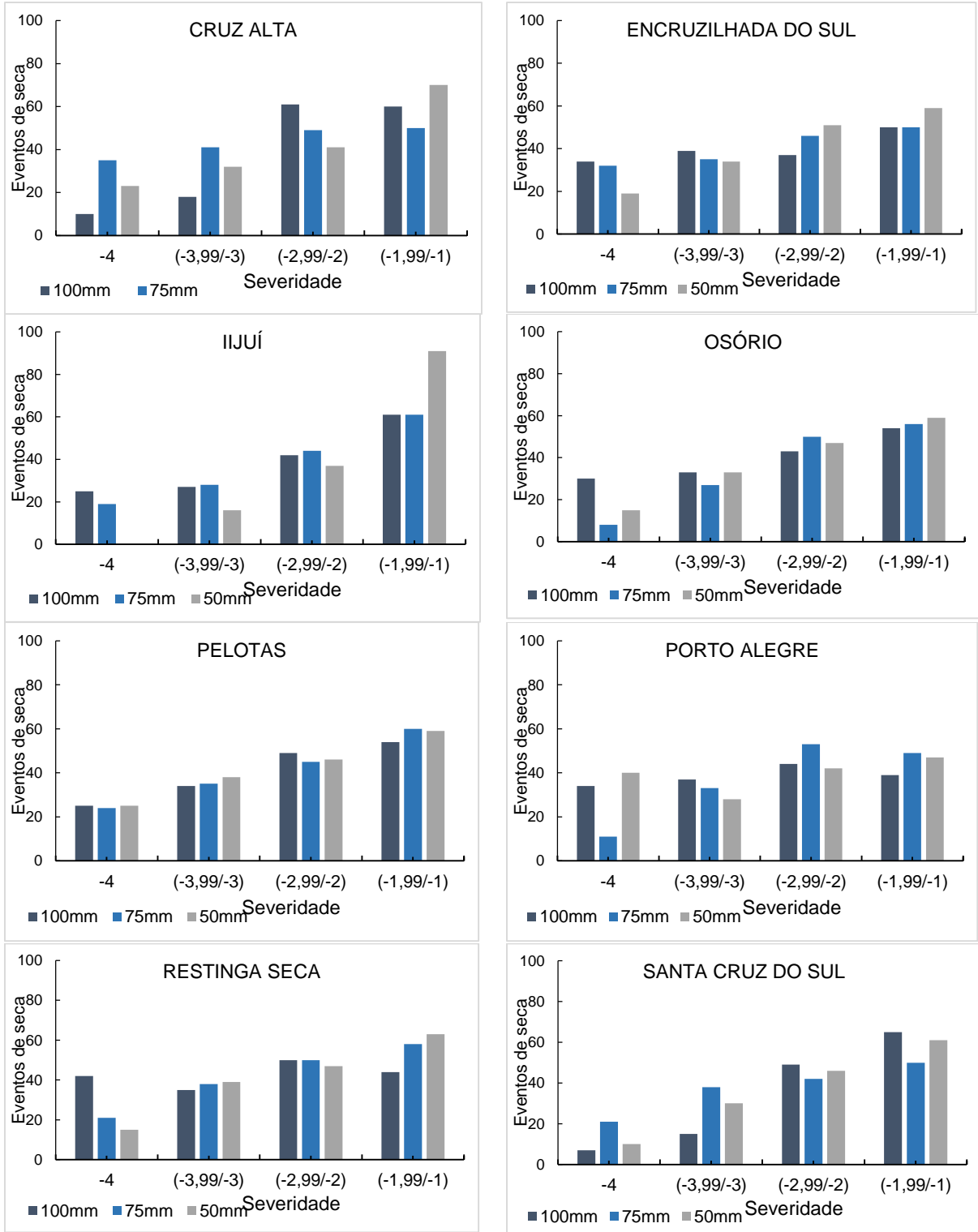


Figura 81- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Cruz Alta, Encruzilhada, Ijuí, Osório, Pelotas, Porto Alegre, Restinga Seca e Santa Cruz do Sul.

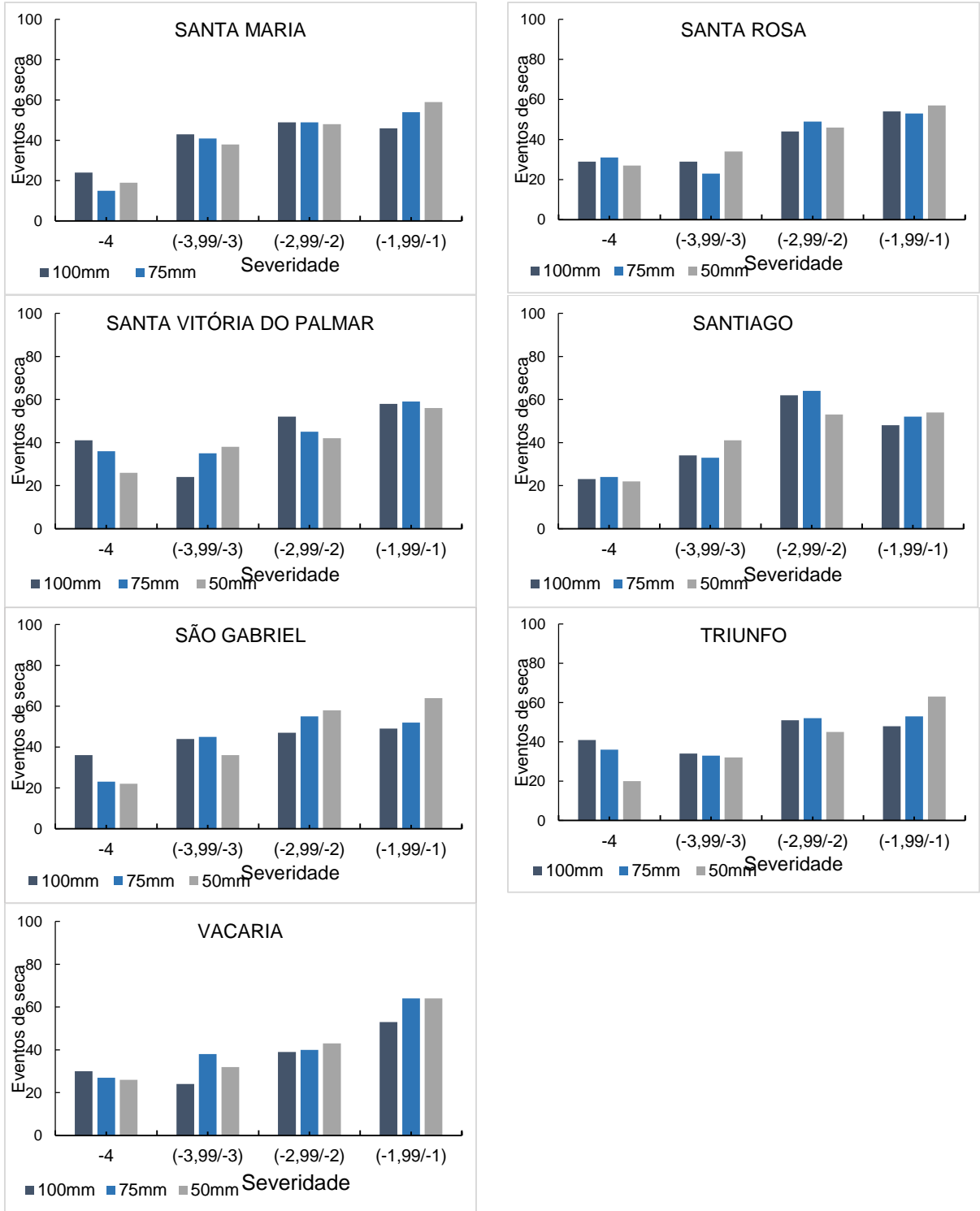


Figura 82- Ocorrências de seca de acordo com o grau de severidade para Santa Maria, Santa Rosa, Santa Vitória, Santiago, São Gabriel, Triunfo e Vacaria.

Observa-se que para a CAD de 100 mm foram identificadas maiores ocorrências de seca extrema para a grande parte das localidades analisadas, como por exemplo, para Alegrete com 39 eventos e Triunfo, com 41 eventos. Para os eventos de seca suave foi detectado ocorrências superiores a 50 eventos de seca, para as 21 localidades calibradas.

Palmer (1965) estabeleceu 11 categorias de classificação dos eventos de seca para o índice PDSI, com valores menores ou iguais a -4,0, que identificam períodos de seca extrema e valores superiores a 4,0, que indicam períodos extremamente úmidos (Tabela 3).

Blain (2005) quando adaptou o índice PDSI para as localidades de São Paulo obteve uma nova classificação, variando de -3,0 a 3,0, cujas classes foram de 0,50 a -0,50 (Próximo ao Normal), -0,51 a -0,99 (Início do período Seco), -1,00 a -1,99 (Moderadamente Seco), -2,00 a -2,99 (Severamente Seco), e -3,00 (Extremamente Seco), ou seja, nove categorias para identificação de períodos secos e úmidos. O autor observou que no caso de seca extremas, apontados pelo PDSI_adapt, identificou apenas um evento, demonstrando que o valor -3,0 é adequado para indicar tais eventos, apresentando ocorrência semelhantes nas diversas localidades do estado de São Paulo.

Nos resultados encontrados para o PDSI-RS as ocorrências de seca extrema foram superiores a 35 eventos, em algumas localidades. Deste modo observa-se que para o Rio Grande do Sul, o valor inferior de -4,00 pode ser indicativo de seca extrema.

Karl (1986) propôs o índice PHDI e atribuiu sete categorias para a classificação do índice, sendo as classes -4,00 (Extremamente Seco), -3,00 a -3,99 (Seca Severa), -1,50 a -2,99 (Ligeiro a Moderadamente Seco), -1,49 a 1,49 (Próximo ao Normal).

Assim pode-se classificar a seca no Estado em seca suave, moderada, severa e extrema, de acordo com as novas classes propostas, com nove categorias (Tabela 12).

Tabela 12- Classes do índice de severidade de seca de Palmer modificado para o Rio Grande do Sul PDSI-RS

PDSI-RS	Categoria
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Umidade Alta
2,00 a 2,99	Umidade Moderada
1,00 a 1,99	Umidade Suave
0,99 a - 0,99	Normal
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

Acredita-se que a utilização de uma nova classificação da severidade da seca agrícola para o Rio Grande do Sul, utilizando dados climáticos da região, faz com que o índice se torne uma ferramenta mais precisa na avaliação de detecção de ocorrências de seca.

7 CONCLUSÃO

a) Para o estado do Rio Grande do Sul, os elementos climáticos do banco de dados de Xavier et al. (2016) podem ser usados para a estimativa da evapotranspiração de referência pelas metodologias de Thornthwaite (1948) e de Penman-Monteith (FAO).

b) A utilização do fator de caracterização climática (K) do Índice de Severidade de Seca possibilita obter os períodos de seca de forma mais realista para a região de estudo.

c) A utilização de diferentes valores de capacidade de água disponível não altera de forma significativa o Índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para o Estado.

d) Houve um aumento no número de eventos de seca, no processo de calibração, pela metodologia de Palmer modificada, comparativamente ao índice proposto por Palmer (1965).

e) O índice de Severidade de Seca de Palmer modificado para as condições climáticas do estado do Rio Grande do Sul foi classificado em seca suave, moderada, severa e extrema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998, 297p. FAO. **Irrigation and Drainage Paper**, 56.

ALLEY, W. M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v.23, p. 1100-1366. 1984. AMERICAN

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologisch e Zeitschrift, Fast Track*. p.1-13, 2013.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. O.; DE SOUSA, V. F.; RIBEIRO, V. Q.L. Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência no estado do Piauí. **Revista da Sociedade Brasileira de Agrometeorologia**, v. 25, n. 1, 2017.

BATISTA JÚNIOR, W. **Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do rio Guandu** – (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. Brasil. 2012

BERLATO, M. A.; FARENZEN, H; FONTANA, D. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade do milho no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.5, p.423-432, maio 2005.

BLAIN, B. C.; XAVIER, A. C. F. Transforming the Palmer drought severity index into a standardized multi-scalar index: Assessing the normality assumption under south America tropical- subtropical conditions. **Cambridge University**, p1-13, 2018.

BLAIN, G. C. 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. 120f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônômico de Campinas. São Paulo. 2005.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.22, n.1, p.105-111, 2007.

BLAIN, G. C.; KAYANO, M. T.; MARCELO BENTO PAES DE CAMARGO, M. B. P.; LULU J. Variabilidade amostral das séries mensais de precipitação pluvial em duas regiões do Brasil: Pelotas-RS e Campinas-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, 1-11, 2009.

BLAIN, G. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEZZOPANE, J. E. M.; BONOMO, R. Índice padronizado de precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.10, p.1067–1073, 2010.

BORGES JÚNIOR, J. C. F. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p.380-390, 2012.

BRITTO, F.P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: Influência do fenômeno El Niño oscilação Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.8, n.3, p.38-48. 2008.

CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMARGO, M. B. P.; CAMARGO, A. P. Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather. **Bragantia**, Campinas, v.52, p.169-172, 1993.

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N.; EBERHARDT, E. L. Balanço hídrico agroclimático para Lages-SC. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.2, n.2, p.118-130, 2003.

CARDOSO, M. C.; JUSTINO, F. Simulação dos Componentes da Evapotranspiração sob Condições Climáticas Atuais e de Cenários Climáticos Futuros de Aquecimento Global com o Uso de Modelos de Clima-Vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.29, n.1, 85 - 95, 2014.

CARVALHO, H. P.; DOURADO NETO, D.; TEODORO, R. E. F. MELO, B. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Biociência Jornal**, v.27, n.2, p.221-229, 2011.

CASTRO, F. S; PEZZOPANE, J. E. M; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.14, n.8, p.871–880, 2010.

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, 81 - 88, 2015.

CONRADO, H.; MARIANO, G. L.; CARVALHO, L. C. Veranicos no Rio Grande do Sul – Nova metodologia para quantificação de eventos. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.36, p.445–455, 2014.

COSTA, J. A.; RODRIGUES, G. P.; SILVA, N. D. da; SOBRINHO, O. P. L.; COSTA, L. D. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Alagoas. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.173-179, 2017.

CUNHA, R. L. A. **Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas**. 2008.147f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Porto. 2008.

DAI, A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, 2011.

EAPEL Estação Agroclimatológica de Pelotas. <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html>. Acesso em 20 de agosto de 2018.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F. E.; AMORIM, A. O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.8, p.771-779, 2010.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A.; DA PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. Índices para a quantificação da seca. Embrapa, Goiás, 2009.

FIRPO, M. A. F.; SANSIGOLO, C. A.; ASSIS, S. V. Climatologia e variabilidade sazonal do número de ondas de calor e de frio no Rio Grande do Sul associadas ao ENOS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, 95 - 106, 2012.

FIGUEREDO JÚNIOR, L.G.M.; ARAUJO, M.J.V.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. Estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal com os métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite e PriestleyTaylor para Parnaíba, Piauí. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: SBAGRO, 2005.

FOCHEZATTO, A.; GRANDO, M. Z. Produção agropecuária e crescimento econômico no Rio Grande do Sul: uma análise de insumo-produto. In: 47º Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Soc. Rural. 14f, 2009. **Anais...** Porto Alegre-RS, 2009.

FREITAS J. C.; ANDRADE, A. R. C.; BRAGA, C. C. NETO A. H. G. ALMEIDA, T. F. Análise de Agrupamentos na Identificação de Regiões Homogêneas de Índices Climáticos no Estado da Paraíba, PB – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v.6, n.4, p.732-748, 2013.

FRITZSONS, E.; WREGGE, M. S. MANTOVANI, L. E. Altitude e temperatura: estudo do gradiente térmico no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**. v.16, p.108-119. 2015.

GOIS G., DELGADO R.C., OLIVEIRA J.F. JR. Modelos teóricos transitivos aplicados na interpolação espacial do Standardized Precipitation Index (SPI) para os Episódios de El Niño forte no estado do Tocantins, Brasil. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 2, p. 371-387, 2015.

GONÇALVES, F. N.; BACK, Á. J. Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, n.3, p11-20, 2018.

HEIM JÚNIOR, R. R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **American Meteorological Society**, p.1149-1165, 2002.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço Hídrico Atual e Simulações para Cenários Climáticos Futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**. Taubaté, v.2, n.2, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). 2017. Disponível em: <http://mapas.fee.tche.br/wpcontent/uploads/Mesorregioes.pdf>. Acessado 16 de Maio. 2017.

KARL, T. The sensitivity of the Palmer Drought Severity Index and Palmer's Z-Index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v.25, p.77-86, 1986.

LIMA, R. P. C. Avaliação de Índices de Severidade de seca na Bacia do Rio Doce visando o desenvolvimento de sistema de classificação de secas. 85f. (Dissertação)- Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais. 2016.

MARTINS, D. S.; PAULO, A. A.; ROSA, R.G.; PEREIRA, L. S. Análise da variabilidade espacial e temporal das secas utilizando índices combinando precipitação e evapotranspiração: SC-PDSI e SC-MedPDSI In: Pires C. A. L. Pereira L. S.(Org). **Predictabilidade Sazonal de Secas: Avaliação ao nível regional e agrícola**. Lisboa. 2015 p. 41-56.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLO GY, 8. 1993, Boston. **Anais...** Boston: American Meteorological Society, 1993. p.179-184. (Preprints)

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

MOREIRA, P. S. P. et al., Distribuição e probabilidade de ocorrência das chuvas no município de Nova Maringá-MT. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 8, n. 1, p. 9-20, 2010.

NDMC – National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, EUA. <http://drought.unl.edu>. Acesso em maio de 2016.

NEDEL, A. S.; SAUSEN, T. M.; SAITO, S. M. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003–2009-Parte I. Seca. In: XVI **Congresso Brasileiro de Meteorologia: Saúde e meio ambiente**. 2010. **Anais...** Belém/PA

NEDEL, A.; SAUSEN, T.; SAITO, S. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 1989 – 2009: granizo e vendaval. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2, 119-126, 2012.

NERY, J. T.; BALDO, M. C.; MARTINS, M. L. O. F. O comportamento da precipitação na Bacia do Itajaí. **Revista Acta Scientiarum**, Maringá, v.22, n.5, p.1429-1435, 2000.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2ª edição, 1989. 422p.

OLIVEIRA, J. A. M.; LOPES J. O.; SANTOS A. F. S. Balanço hídrico climatológico para o município de Januária-MG. **Revista UNIVAP**. Paraíba, v.22, n. 40, 2016.

PALMER, W.C. Meteorological drought. US Weather Bureau, (Research Paper, nº45). Washington, 58p, 1965.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Estimativa de evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, p.41-99, 1997.

PILAU, F.G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E.Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.2, p.283-290, 2012.

PIRES C. A. L. INTRODUÇÃO À PREDICTABILIDADE SAZONAL DE SECAS. In: Pires C. A. L. Pereira L. S.(Org). **Predictabilidade Sazonal de Secas: Avaliação ao nível regional e agrícola**. Lisboa. 2015 p. 3-15.

PORTO, R. O. As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência? In: NASCIMENTO, C. A. M.; SILVEIRA FILHO, I. L.; BERTON, A. L.; BERLATO, M. A.; MELO, I. B.; CORDEIRO, A. P. A.; PORTO, R. O.; FERREIRA, T. N.; ALMEIDA, A. C.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. EVERLING, P. As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevidência? Esteio: **FEDERACITE**, p.17-42, 2005.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, p.81–92, 1972.

QUIRING, S. M.; PAPAKRYAIKOU, T. N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.118, p. 49-62, 2003.

ROSSATO, L.; MARENGO, J.A.; ANGELIS, C.F.; DE PIRES, L.B.M.; MENDIONDO, E.M. Impact of soil moisture over Palmer Drought Severity Index and its future projections in Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre. v. 22. 2017.

SANTOS, R. M. N.; PEREIRA, A. R. Índice de Severidade de Seca de Palmer para a região oeste do Estado de São Paulo, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n 1, p.139-145, 1999.

SENTELHAS, P. C. Agricultural Drought Indices Proceedings of an Expert Meeting. In: SIVAKUMAR, M. V. K.; MOTHA, R. P.; WILHITE, D.A.; WOOD, D. A.

Agricultural Drought Indices in Current Use in Brazil. Murcia, Spain. 2-4 June, 2010.

SILVA, A. O. **Aplicação dos índices de Palmer e Bhalme & Mooley na avaliação da seca no estado do Ceará.** 2011. 115 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

SILVA, M. V. **Análise sazonal do regime hídrico do Rio Grande do Sul no período de 1977 a 2006: impacto de sistemas meteorológicos no regime hídrico do Estado em 2006.** 120f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Pelotas, 2010.

SILVA, V. H. **Relação do índice de seca de Palmer com a produtividade do café no estado do Espírito Santo e da soja nos estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul.** 55 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. Espírito Santo. 2016.

SILVEIRA, S. C. R. **Índice de Seca agrícola e meteorológica para algumas localidades no Estado do Rio Grande do Sul.** 102f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) Universidade Federal de Pelotas. 2016.

SOPPA, M. A.; SOUZA, R.B.; PEZZI L.P. Variabilidade das anomalias de temperatura da superfície do mar no Oceano Atlântico Sudoeste e sua relação com o fenômeno El Nino Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, p. 347-363, 2011.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38; p.55–94, 1948.

THORTHWAITE, C. W.; MATTER, J. R. The water balance. *Climatology*, New Jersey, Drexel Institute of Thecnology, 104p. 1955.

VEBER, P. M.; NETA, M. C.; MANKE, E. B.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F. Análise de consistência entre dados interpolados e observados de precipitação do município de Pelotas/RS. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 6, 2019.

VROCHIDOU, A. E.; TSANIS, I.K.; GRILLAKIS, M.G.; KOUTROULIS, A.G. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. **Journal of Hydrology**. v. 476, p 290-301.2013

WANG, Y.; LIU, G.; GUO, E. Spatial distribution and temporal variation of drought in Inner Mongolia during 1901–2014 using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Science of The Total Environment**, v. 654. p.850-862, 2018.

WELLS, N.; GODDARD, S.; HAYES, M.J. A self-calibrating Palmer drought severity index. **Journal of Climate** v.17, p 2335–2351, 2004.

WILHITE, D.A.; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO); GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). National drought management policy guidelines: a template for action. Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines Series 1. Geneva, Switzerland, and GWP, Stockholm, Sweden: WMO, 2014b.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON.; S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

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

APÊNDICES

Apêndice A

Valores de perda potencial (PL), recarga potencial (PR), escoamento superficial potencial (PRO), recarga (R), perda (L), escoamento (RO) para o índice PDSI-RS.

ANO	MÊS	Valores Potenciais					
		PL	PR	PRO	R	L	RO
1980	1	169,4	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0
	2	148,7	0,0	100,0	0,0	48,6	0,0
	3	60,5	48,6	51,4	0,0	26,0	0,0
	4	25,4	74,6	25,4	0,0	4,1	0,0
	5	21,4	78,6	21,4	12,5	0,0	0,0
	6	30,5	66,2	33,8	0,0	2,8	0,0
	7	28,6	69,0	31,0	69,0	0,0	48,1
	8	80,1	0,0	100,0	0,0	31,7	0,0
	9	67,4	31,7	68,3	0,0	22,9	0,0
	10	47,4	54,6	45,4	0,0	17,7	0,0
	11	28,9	72,3	27,7	0,0	14,1	0,0
	12	13,6	86,4	13,6	0,7	0,0	0,0
1981	1	14,2	85,8	14,2	0,0	8,9	0,0
	2	5,3	94,7	5,3	22,4	0,0	0,0
	3	28,7	72,3	27,7	0,0	21,1	0,0
	4	6,6	93,4	6,6	0,0	1,6	0,0
	5	5,0	95,0	5,0	0,0	2,2	0,0
	6	2,8	97,2	2,8	74,2	0,0	0,0
	7	59,0	23,0	77,0	8,3	0,0	0,0
	8	75,6	14,7	85,3	0,0	32,9	0,0
	9	47,3	47,7	52,3	47,7	0,0	39,1
	10	122,9	0,0	100,0	0,0	69,9	0,0
	11	33,1	69,9	30,1	0,0	15,7	0,0
	12	14,4	85,6	14,4	0,0	9,8	0,0
1982	1	4,7	95,3	4,7	0,0	4,2	0,0
	2	0,5	99,5	0,5	0,0	0,2	0,0
	3	0,3	99,7	0,3	0,0	0,3	0,0
	4	0,1	99,9	0,1	0,0	0,1	0,0
	5	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	6	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	109,5
	7	66,0	0,0	100,0	0,0	0,0	79,9
	8	76,6	0,0	100,0	0,0	0,0	57,3
	9	100,5	0,0	100,0	0,0	0,0	62,1
	10	126,5	0,0	100,0	0,0	0,0	35,0
	11	120,4	0,0	100,0	0,0	0,0	23,2
	12	156,1	0,0	100,0	0,0	61,8	0,0

Apêndice B

Valores médios das series históricas do índice PDSI-RS

Mês	Médias								
	P	ET0	PL	PR	PRO	R	L	RO	ETr
1	110,9	209,3	25,6	80,1	19,9	0,0	7,9	0,0	117,1
2	116,8	177,8	14,3	87,9	12,1	4,9	4,0	1,4	115,3
3	98,1	166,0	14,7	87,0	13,0	0,8	5,0	0,0	102,7
4	110,9	123,1	8,2	91,2	8,8	17,3	0,5	1,9	92,4
5	101,5	92,1	19,9	74,4	25,6	21,8	4,2	6,6	77,4
6	133,8	73,3	29,1	56,8	43,2	34,6	1,2	27,8	70,4
7	151,5	81,3	51,7	23,4	76,6	11,9	2,0	62,7	79,8
8	132,2	99,2	68,4	13,5	86,5	7,6	10,8	38,6	94,7
9	151,2	121,9	79,8	16,7	83,3	8,7	12,2	37,2	115,8
10	138,1	158,2	95,2	20,2	79,8	3,2	22,8	16,4	140,1
11	116,6	192,9	81,2	39,8	60,2	1,6	26,0	5,8	137,1
12	107,6	209,1	47,1	64,1	35,9	0,7	19,5	1,0	126,0

Apêndice C

Valores dos Coeficientes de evapotranspiração (α), coeficiente de recarga (β), escoamento (γ), perda (δ) para o índice PDSI

Mês	Coeficientes			
	α	β	γ	δ
1	0,6	0,1	0,0	0,0
2	0,6	0,0	0,1	0,3
3	0,6	0,1	0,0	0,1
4	0,8	0,0	0,2	2,1
5	0,8	0,1	0,3	1,1
6	1,0	0,0	0,6	1,2
7	1,0	0,1	0,8	0,2
8	1,0	0,8	0,4	0,1
9	0,9	0,7	0,4	0,1
10	0,9	1,1	0,2	0,0
11	0,7	0,7	0,1	0,0
12	0,6	0,3	0,0	0,0

Apêndice D

Valores dos Parâmetros Climaticamente Apropriados às Condições existentes (CAFEC).

ANO	MÊS	CAFEC				
		ET	R	RO	L	P_CAFEC
1980	1	122,2	0,5	0,6	0,7	122,2
	2	123,7	0,0	11,8	51,4	84,2
	3	99,2	2,8	0,0	3,2	98,8
	4	101,6	0,4	5,5	53,4	54,1
	5	76,3	4,5	5,5	23,4	62,8
	6	82,3	1,4	21,7	36,2	69,2
	7	80,0	5,9	25,4	6,6	104,8
	8	94,1	0,0	44,6	8,9	129,9
	9	117,2	23,0	30,5	7,4	163,4
	10	120,0	61,6	9,3	1,6	189,4
	11	127,4	47,2	2,7	0,6	176,7
	12	109,9	26,2	0,4	0,2	136,3
1981	1	112,6	8,4	0,0	0,0	121,0
	2	107,7	4,3	0,6	1,8	110,8
	3	105,1	4,1	0,0	1,5	107,7
	4	92,2	0,5	1,4	13,9	80,3
	5	91,4	5,4	1,3	5,5	92,6
	6	73,6	2,1	1,8	3,3	74,2
	7	88,8	2,0	63,0	13,6	140,3
	8	104,3	11,8	38,0	8,4	145,7
	9	101,5	34,6	23,4	5,2	154,3
	10	138,3	0,0	20,6	4,1	154,8
	11	134,9	45,6	2,9	0,7	182,8
	12	125,3	26,0	0,4	0,2	151,5
1982	1	131,0	9,4	0,0	0,0	140,4
	2	107,2	4,5	0,1	0,2	111,5
	3	111,7	5,7	0,0	0,0	117,4
	4	107,2	0,6	0,0	0,2	107,6
	5	84,0	5,7	0,0	0,0	89,6
	6	63,5	2,1	0,0	0,0	65,6
	7	78,4	0,0	81,9	15,2	145,1
	8	89,7	0,0	44,6	8,5	125,8
	9	119,8	0,0	44,7	11,0	153,5
	10	142,6	0,0	20,6	4,2	158,9
	11	108,6	0,0	9,7	2,4	115,9
	12	120,9	0,0	2,8	2,4	121,4

Apêndice E

Valores da anomalia hídrica (d'), valores absolutos (D), fator de caracterização climática (K), índice de umidade (Z), índice PDSI-RS.

ANO	MÊS	d'	D	K	Z	PDSI-RS
1980	1	-23,5	0,9	1,2	-1,1	-1,1
	2	39,9	1,6	0,9	1,4	1,2
	3	-8,7	0,3	1,0	-0,3	-0,1
	4	63,8	2,5	0,9	2,4	2,4
	5	40,5	1,6	0,9	1,4	1,9
	6	7,7	0,3	0,9	0,3	0,6
	7	93,8	3,7	0,9	3,3	3,5
	8	-69,4	2,7	0,9	-2,6	-2,0
	9	-80,9	3,2	1,0	-3,1	-3,5
	10	-103,3	4,1	1,1	-4,6	-5,4
	11	-69,0	2,7	1,0	-2,6	-3,6
	12	46,8	1,8	0,9	1,7	1,1
1981	1	-18,8	0,7	1,2	-0,9	-0,7
	2	77,6	3,1	0,9	2,7	2,6
	3	-81,1	3,2	1,0	-3,1	-2,7
	4	14,5	0,6	0,9	0,5	0,0
	5	-43,4	1,7	0,9	-1,5	-1,6
	6	76,6	3,0	0,9	2,8	2,5
	7	-41,5	1,6	0,9	-1,5	-1,0
	8	-85,2	3,4	0,9	-3,2	-3,4
	9	39,3	1,5	1,0	1,5	0,9
	10	-118,7	4,7	1,1	-5,3	-5,2
	11	-66,6	2,6	1,0	-2,5	-3,5
	12	-56,7	2,2	0,9	-2,1	-2,8
1982	1	-129,0	5,1	1,2	-4,0	-4,5
	2	16,3	0,6	0,9	0,6	-0,7
	3	-79,6	3,1	1,0	-3,1	-3,2
	4	-90,3	3,6	0,9	-3,3	-4,0
	5	-40,1	1,6	0,9	-1,4	-2,2
	6	209,9	8,3	0,9	7,6	7,3
	7	14,7	0,6	0,9	0,5	1,9
	8	25,5	1,0	0,9	0,9	1,3
	9	34,7	1,4	1,0	1,3	1,6
	10	37,1	1,5	1,1	1,7	2,0
	11	60,1	2,4	1,0	2,3	2,7
	12	-17,0	0,7	0,9	-0,6	-0,1