

AGROMETEOROLOGIA

AVALIAÇÃO E ADAPTAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI) E DO ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO (SPI) ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO ⁽¹⁾

GABRIEL CONSTANTINO BLAIN ^(2,3); ORIVALDO BRUNINI ^(2,4)

RESUMO

O Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) acusa o início de uma seca quando a precipitação pluvial de uma região diminui consideravelmente em relação a que seria climatologicamente esperada. Tal déficit é ponderado por um fator K de caracterização climática. Com base no ajuste de séries de precipitação à distribuição gama, o Índice Padronizado de Precipitação (SPI) quantifica o excesso ou o déficit de chuva, acumulados em diferentes escalas de tempo, em um determinado local. O presente trabalho avaliou e adaptou a metodologia do PDSI e do SPI às condições climáticas do Estado de São Paulo e comparou seus valores a parâmetros do balanço hídrico climático de treze localidades. De maneira geral, essa comparação foi realizada entre os quantificadores e o desvio (anomalia) que se observava nos parâmetros do balanço hídrico climático de um determinado período, em relação aos valores climatologicamente esperados para o intervalo de tempo em questão. O SPI teve seus resultados analisados em diversas escalas de tempo. O ajuste do PDSI (PDSI_{adap}) teve como foco principal o fator K e a equação final do índice. As análises permitiram concluir que, o PDSI_{adap} é uma ferramenta consistente para o monitoramento, da seca meteorológica, na escala mensal no Estado de São Paulo. Constatou-se também que o SPI é um método apropriado para a quantificação do déficit de precipitação pluvial, em diversas escalas de tempo. Ambos os índices devem, portanto, ser utilizados em decisões governamentais de planos de combates aos efeitos do fenômeno natural seca.

Palavras Chave monitoramento em tempo real, seca meteorológica, condições hídricas.

ABSTRACT

TEST AND ADAPTATION OF THE PALMER DROUGHT SEVERITY INDEX (PDSI) AND THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI) TO THE CLIMATE CONDITIONS OF THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

A drought event for the Palmer Drought Severity Index (PDSI) is defined as a period of time during which the actual moisture supply at a given place rather consistently falls short of the climate appropriate moisture supply. Based on historical precipitations series, which were fitted to the gamma distribution, the Standardized Precipitation Index (SPI) recognizes the importance of the time scale in the analysis of

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 11 de janeiro e aceito em 15 de julho de 2005.

⁽²⁾ Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ecofisiologia e Biofísica, Instituto Agrônomo, Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas (SP). E-mail: gabrielblain@iac.sp.gov.br; E-mail: brunini@iac.sp.gov.br.

⁽³⁾ Bolsista CAPES.

⁽⁴⁾ Bolsista CNPq.

the water availability and water management. Based on parameters of the water balance of thirteen regions, the scope of this study was to test and adapt the PDSI and the SPI models to the climate conditions of the State of São Paulo. The tests were done caring out the index values and the deviations between the estimated water balance parameters in a period and the climate expected value of this parameters for the period that is been considerate. The SPI values were tested in several times scales. The main focus of the PDSI adjustment (PDSI adap) was the adaptation of the K factor and the Palmer's index final equation. The analysis allows to conclude that such study resulted in a useful tool for the monthly "real time monitoring" of the meteorological drought conditions for the State of São Paulo. The SPI model also demonstrated to be a consistent "precipitation deficit monitoring tool" in several time scales. Both indices should be used as part of a overall state government actions to drought affected regions and mitigation policy.

Key words: near real time monitoring, precipitation deficit, meteorological drought, climate conditions

1. INTRODUÇÃO

Um passo importante em uma análise científica é definir e especificar os componentes do problema sob estudo. Essa etapa requer o isolamento do objeto de pesquisa dos demais fatores e a formulação de definições claras dos conceitos importantes que o compõem. Certamente, a pesquisa sobre o fenômeno seca não é uma exceção à essa regra. É necessário decidir exatamente o significado do termo seca antes que qualquer proposta de análise seja desenvolvida ou utilizada. Entretanto, estabelecer uma definição universal desse evento tem se mostrado uma tarefa difícil. (DRACUP et al., 1980). A maior parte dos trabalhos científicos reconhece quatro tipos de seca: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica (WILHITE e GLANTZ, 1987 e RASMUSSEN, 1993).

Enquanto a seca meteorológica é o resultado de um déficit de precipitação pluvial, a hidrológica é uma deficiência no volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios (WILHITE, 2000). Esse primeiro tipo de seca pode se desenvolver rapidamente e "acabar abruptamente" enquanto a hidrológica necessita de um período prolongado de déficit de precipitação pluvial, entretanto persistirá por mais tempo que a meteorológica (HEIM JUNIOR, 2002). A seca agrícola está relacionada à baixa disponibilidade de umidade no solo, a qual torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas por evapotranspiração (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1975). Além de estar relacionada a fases críticas do desenvolvimento/crescimento dos vegetais, o início de uma seca agrícola pode-se distanciar do de uma seca meteorológica, pois depende quase exclusivamente da umidade das camadas superficiais (zona radicular) do solo (HEIM JUNIOR, 2002). KEYANTASH e DRACUP (2004) afirmam que, a menos que a demanda por água da sociedade exceda significativamente o suprimento natural, a seca socioeconômica é uma consequência dos

demais tipos de seca, sendo caracterizada monetariamente.

Segundo WILHITE e GLANTZ (1987), todos os tipos de seca são originados por um déficit de precipitação que resulta em uma baixa disponibilidade hídrica para a atividade que a requer. A AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (1997) sugere que a escala de tempo de análise e a distribuição espacial dos processos de oferta e demanda hídrica são bases para uma definição adequada de seca e, portanto, de qualquer índice.

Vários indicadores têm sido utilizados para quantificar, padronizar e comparar a seca em base temporal e regional; entre eles o mais conhecido é o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) (BRUNINI et al., 2002). PALMER (1965) define seca como o intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até anos, durante o qual o abastecimento hídrico de uma região cai consideravelmente em relação ao "climatologicamente" esperado ou apropriado. Outro índice atualmente utilizado é o Índice Padronizado de Precipitação ("Standardized Precipitation Index", SPI), que foi desenvolvido por MCKEE et al., (1993 e 1995) e é a única ferramenta conhecida capaz de quantificar e monitorar a seca em diferentes escalas de tempo. Para MCKEE et al., (1993) tais escalas ao serem relacionadas ao déficit de precipitação pluvial, tornam-se extremamente importantes caracterizando os diferentes tipos de seca.

Segundo GUTTMAN (1998) o SPI, ao ser comparado ao PDSI, representa melhor os possíveis períodos de déficit ou excesso de precipitação. Autores como, MCKEE et al (1993; 1995), GUTTMAN (1998;1999), HAYES et al (1999) e KEYANTASH e DRACUP (2004) observaram que o SPI é uma ferramenta que vai otimizar o "tempo de identificação" de condições emergentes de uma seca, devendo por esse fato substituir naturalmente o PDSI como ferramenta de monitoramento.

BRUNINI et al., (2002) afirmam que os enormes prejuízos sofridos pela agricultura paulista, nos anos de 1963 e 1964, foram causados por uma seca extrema ocorrida nesse Estado. Esses autores afirmam ainda, que apesar do seu grande desenvolvimento tecnológico atual, a agricultura paulista é freqüentemente castigada por adversidades climáticas, sendo a seca de efeito mais duradouro e maior intensidade.

Tendo em vista todos esses fatos, o uso de ferramentas avaliadas nas condições climáticas do Estado de São Paulo, que auxiliem no monitoramento e no combate à seca, torna-se extremamente importante. Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar e adaptar o Índice de Severidade de Seca de Palmer e o Índice Padronizado de Precipitação às condições climáticas do Estado de São Paulo, relacionando os resultados a parâmetros do balanço hídrico de THORNTHWAITE e MATHER (1955) como o excedente (Exd), a deficiência (Def) hídrica, a razão entre a evapotranspiração real (ETR) e a evapotranspiração potencial (ETP) e a própria precipitação pluvial.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de temperatura e chuva de doze postos meteorológicos do Estado de São Paulo pertencentes ao Instituto Agrônomo da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo e do posto meteorológico da Escola

Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Tabela 1). As localidades de Campinas, Jaú, Mococa, Piracicaba, Ribeirão Preto e Tatuí são denominadas de localidades-base do estudo, por terem sido usadas no desenvolvimento da equação final do índice de Palmer adaptado. Os anos de 1963 e 1964 foram comumente utilizados nesse estudo por serem os períodos mais secos das séries históricas em questão.

O Índice Padronizado de Precipitação quantifica o déficit ou o excesso de precipitação em diferentes escalas de tempo. Tal característica torna o SPI uma valiosa ferramenta nos diversos estudos de disponibilidade hídrica seja de curta seja de longa duração (HAYES et al., 1999). O cálculo do índice inicia-se com a determinação da probabilidade de distribuição de freqüência de precipitação, a qual é calculada por meio da distribuição gama incompleta. A função normal inversa (Gaussiana) é aplicada a essa probabilidade. O resultado é o SPI. O evento seca começa quando o SPI torna-se negativo e atinge o valor de -1 e termina quando volta a apresentar valores positivos.

Os testes do qui-quadrado e do Komolgorov-Smirnov foram aplicados a todas as localidades, nos meses de janeiro, julho e outubro, por representarem respectivamente, estações úmidas, secas e de transição. Foram ainda efetuadas regressões lineares entre valores do SPI e as respectivas precipitações pluviais, a fim de verificar se a variação desse índice, em relação ao da chuva, pode ser aproximado ao comportamento linear.

Tabela 1. Postos meteorológicos utilizados e suas respectivas séries históricas.

Município	Latitude Sul	Longitude Oeste	Altitude (m)	Período	Órgão
Campinas	22°54'	47°05'	669	1960 a 2003	IAC/SAA
Jaú	22°17'	48°34'	580	1960 a 2003	IAC/SAA
Mococa	21°28'	47°01'	665	1960 a 2003	IAC/SAA
Piracicaba	22°43'	47°38'	580	1960 a 2003	(ESALQ/USP)
Rib. Preto	21°11'	47°48'	620	1960 a 2003	IAC/SAA
Tatuí	23°22'	47°52'	600	1960 a 2003	IAC/SAA
Jundiaí	23°12'	46°53'	715	1971 a 2003	IAC/SAA
Manduri	23°00'	49°19'	700	1960 a 2003	IAC/SAA
Mte Alegre	22°41'	46°43'	777	1959 a 2002	IAC/SAA
Pindorana	22°13'	48°56'	562	1951 a 2003	IAC/SAA
Pariquera	24°43'	47°53'	25	1960 a 2003	IAC/SAA
Ubatuba	23°27'	45°04'	8	1971 a 2003	IAC/SAA
Val.Gentil	20°25'	50°04'	504	1970 a 2003	DAEE

Após o cálculo do balanço hídrico seqüencial, de acordo com método de THORNTHWAITE e MATHER (1955), nas treze localidades deste estudo, foi gerada, em cada local, uma coluna adicional denominada Exc - Def para toda a série histórica discriminada na tabela 1, sendo diferença entre os parâmetros excedente e a deficiência hídrica de cada mês. A média mensal dessa nova coluna foi calculada e denominada (Exd - Def) Médio, representando a condição hídrica esperada para o mês em questão. A subtração entre a coluna Exc - Def e (Exd - Def) Médio dá origem à terceira coluna denominada anomalia hídrica (AH). Foram realizadas regressões lineares entre valores de AH e do SPI, agrupados em meses iguais, nas diversas localidades desse estudo. O comportamento do SPI em relação ao do AH nas escalas de tempo mensal e anual também foi estudado.

Período de calibração do SPI é a série histórica usada para determinar os parâmetros alfa e beta e a probabilidade de ocorrência de precipitação igual a zero. Assim, a localidade de Campinas teve o SPI mensal e anual calculado com base em diferentes séries históricas, a fim de verificar se diferentes épocas de "calibração" afetam a magnitude do SPI em um mesmo período de análise. Os resultados foram comparados por análise de regressão linear e por meio do índice de concordância de WILMOTT et al. (1985). A frequência de ocorrência das classes definidas na tabela 2 foi calculada para a média das treze localidades desse estudo

Uma das principais etapas da metodologia do PDSI é o cálculo da precipitação "Climatologicamente Apropriados às Condições Existentes" (P) a qual pode ser entendida como o valor de precipitação mensal necessário para que uma determinada área permaneça sob condições climáticas normais. Tal parâmetro será calculado como descrita por PALMER (1965).

Para o cálculo da anomalia hídrica mensal (d), a precipitação pluvial observada no mês (P_i) é comparada a P do mesmo período:

$$d = P_i - P_i \quad (1)$$

Como PALMER (1965) objetivava desenvolver um índice padronizado comparável em diferentes localidades em qualquer época, d teve de ser padronizado (ponderado) em base regional (KARL, 1986). Assim, PALMER (1965) desenvolve um fator de caracterização climática designado pela letra K.

$$K = 17.67 * K' / \sum_{i=1}^{12} DK' \quad (2)$$

Em que:

$$K' = 1,5 \log_{10} (T + 2,8) / D + 0,5 \quad (3)$$

T Razão entre o suprimento e a demanda hídrica em uma região (4)

D a média mensal dos valores absolutos de d.

A equação final do índice é:

$$X_i = (Z_i / 3) + 0897 * X_{i-1} \quad (5)$$

Em que:

X_i o valor do índice de Palmer do mês questão;

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

$$Z = d * K \quad (6)$$

Segundo KARL (1986) a equação 5 é, devido a sua grande memória, apropriada a um índice de seca hidrológica. Entretanto, o objetivo de Palmer (1965) era desenvolver uma ferramenta meteorológica. Assim, para caracterizar apenas as condições meteorológicas, PALMER, (1965) dividiu a equação 5 em três categorias (X_1 , X_2 e X_3): X_1 Período úmido não estabilizado (valores da equação 5 entre zero e 1); X_2 Período seco não estabilizado (valores da equação 5 entre zero e menos 1); X_3 Período estabilizado. (valores da equação 5 maiores que 1 ou menores que -1).

Nota-se que uma seca é considerada estabelecida, quando o valor do índice cai abaixo de -1. O valor final do índice é então escolhido como uma das três categorias acima citadas, o que segundo ALLEY (1984) e KARL (1986) requer, em alguns casos, a "espera" de meses subseqüentes para tal, pois não é raro em períodos não estabelecidos, X_1 e X_2 serem indicados simultaneamente, dificultando o uso do índice para o monitoramento em tempo real. A fim de estabelecer o fim de uma seca meteorológica PALMER (1965) desenvolveu a equação 7, a qual expressa a umidade recebida por uma área como porcentagem da umidade requerida para definitivamente terminar um período estabilizado nessa mesma região.

$$Pe = \frac{\sum_{j=0}^{i=j^*} U_{i-j}}{Ze + \sum_{j=1}^{i=j^*} U_{i-j}} * 100\% \quad (7)$$

Em que:

$Ze(i) = -2.691X_3(i-1) - 1.5$ (No caso de seca estabelecida) (8)

$U = Z + 0.15$ (No caso de seca estabelecida) (9)

Ou

$Ze(i) = -2.691X_3(i-1) - 1.5$ (No caso de período úmido estabelecido) (10)

$U = Z - 0.15$ (No caso de período úmido estabelecido) (11)

Tabela 2. Categorias de seca

PDSI	CATEGORIA	SPI	CATEGORIA
0,49 a -0,49	Próximo ao Normal	0 a -0,99	Seca Incipiente
-0,50 a -0,99	Seca Incipiente	-1,00 a -1,49	Moderadamente Seco
-1,00 a -1,99	Ligeiramente Seco	-1,50 a -1,99	Severamente Seco
-2,00 a -2,99	Moderadamente Seco	£ - 2,00	Extremamente Seco
-3,00 a -3,99	Muito Seco	-	-
£ - 3,99	Extremamente Seco	-	-

Ze, representa o valor necessário de Z para que, em um único mês o PDSI atinja o valor de -0,5 (+0,5) no caso de uma seca (período úmido) estabelecida e j, indica o número de meses em que está sendo registrado um período estabelecido. As categorias de classificação de eventos secos de acordo com o PDSI e com o SPI são demonstradas na tabela 2.

A adaptação do PDSI às condições do Estado de São Paulo, teve como foco principal o fator K de caracterização climática. Os outros elementos da metodologia original, como os fatores CAFEC e o índice d, foram calculados como descritos no trabalho original de PALMER (1965). Foi calculado o ajuste final do fator K com base na média da soma anual do produto DK' de nove localidades dos Estados Unidos da América. O mesmo método foi usado para as doze localidades pertencentes ao Instituto Agrônomo (IAC-SAA), resultando em um produto DK' médio igual a 22,80 logo, a expressão final de K para o Estado de São Paulo torna-se:

$$K = (22,8K') / \sum DK' \quad (12)$$

O desvio-padrão e o coeficiente de variação foram calculados para o produto DK' médio de 22,80. Definido tal parâmetro, o índice Z de anomalia hídrica para cada mês em cada uma das seis localidades-base foi calculado. Regressão linear simples entre índices Z acumulados e seus respectivos números de meses de ocorrência, foi realizada nos períodos destacados:

Campinas: jul/61 a set/61; jul/61 a out/61; jul/63 a set/63; mar/63 a set/63 e dez/63 a Jan/64;

Jaú: jul/60 a set/60; fev/63 a maio/63; jul/63 a set/63 e fev/63 a out/63;

Mococa: agost/60 a out/60; jul/60 a out/60; jul/61 a set/61; maio/61 a set/61; maio/61 a set/61; maio/61 a out/61; jul/63 a set/63 e mar/63 a out/63;

Piracicaba: agost/61 a out/61; fev/63 a maio/63; fev/63 a set/63 e mar/64 a jun/64;

Ribeirão Preto: mar/60 a out/60; jul/60 a set/60; jul/60 a out/60; jun/61 a out/61 jul/61 a set/61; 2/63 a out/63 e fev/63 a dez/63;

Tatuí: jul/61 a set/61; jul/63 a set/63 e fev/63 a set/63

A regressão linear resultou na equação:

$$\sum Z_{t-1} = -2,409t - 0,43 \quad (13)$$

Em que:

t - número de meses do período considerado e;

$\sum_{i=1} Z(t)$ - índice Z acumulado no período considerado.

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado, a fim de verificar se todos os períodos utilizados tinham condição semelhante de seca, ou seja, uma taxa uniforme de variação do índice z independentemente do local e do número de meses de ocorrência. Como descrito anteriormente, PALMER (1965) adotou o valor arbitrário de -4 como indicativo de seca extrema. Entretanto, analisando os resultados gerados pelo índice original para as séries históricas em questão, nota-se apenas um evento com PDSI menor que tal valor, ocorrido na localidade de Piracicaba em abril de 1964. Assim, o valor (também arbitrário) -3 foi adotado como o indicativo de seca extrema para o Estado de São Paulo. A equação resultante é:

$$PDSI_{adap_i} = (Z_i / 0,94) + 0,15 * PDSI_{adap_{i-1}} \quad (14)$$

Por meio da equação 14 foram calculados valores do índice final (denominado de PDSI_{adap}) para as doze localidades em questão. Valores do PDSI_{adap}, do PDSI e de AH foram agrupados em meses iguais a fim de calcular o coeficiente (R^2) de determinação gerado por regressões lineares entre esses elementos para janeiro, março, julho e outubro nas regiões em questão.

Os valores de -1 e de -0,5 foram testados como limite entre o fim e o início de uma seca. Em outras palavras, quando o valor do PDSI adap cair abaixo desse limite, a seca está detectada e quando o índice retornar ou ultrapassar esse patamar essa anomalia climática chegou ao fim. A coerência desses limites foi avaliada por meio da equação 14, fazendo-se $PDSI_{adap_i} = -1$ e $PDSI_{adap_i} = -0,5$:

Para $PDSI_{adap_i} = -1$ tem-se:

$$Z_{esp} = Z_i = -0,14 * PDSI_{adap_i} - 1 - 0,94 \quad (15)$$

Para $PDSI_{adap_i} = -0,5$ tem-se:

$$Z_{esp} = Z_i = -0,14 * PDSI_{adap_i} - 1 - 0,47 \quad (16)$$

Em que:

$$Z_{esp} = d_{esp} * K. \quad (17)$$

Z_{esp} é o valor que o índice Z_i de anomalia hídrica deveria ter tido (nos meses subsequentes a essa detecção) para que o PDSI adap voltasse a indicar condição hídrica normal em uma determinada área, e " d_{esp} " é o valor que d deveria apresentar para que tal fato ocorresse. Assim, pôde-se estimar qual valor de precipitação pluvial deveria ter ocorrido (P_{esp}) para que o índice não indicasse condições de seca tanto para o limite de -1 como para o de -0,5:

$$P_{esp} = (Z_{esp}/K) + P \quad (18)$$

Portanto, se o valor de PDSI adap escolhido como limite for coerente com as condições hídricas médias de uma região, a P_{esp} resultante, pode ser considerada como o valor de precipitação pluvial que traria as condições hídricas de um local ao patamar climatologicamente esperado. Essa afirmação foi avaliada em 1961, 1963, e 2003, para as localidades

de Campinas, Jaú, Mococa, Piracicaba, Ribeirão Preto e Tatuí comparando-se a relação ETR/ETP, que seria obtida em um balanço hídrico seqüencial se a precipitação ocorrida fosse igual a P_{esp} , e a média mensal da relação ETR/ETP de 1961 a 1990. Tal comparação foi realizada calculando-se o coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância de WILLMOTT (1985).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação dos testes de aderência qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov permitiu concluir que a distribuição gama incompleta pode ser usada para o ajuste de séries históricas mensais de precipitação pluvial ao nível de significância 5% no Estado de São Paulo. Entretanto, o comportamento do SPI, em uma longa série histórica, não pode ser aproximado ao linear, como é exemplificado na Figura 1 (maio) para a escala mensal.

Analisou-se a Figura 1 por meio da equação 11:

$$SPI' = 0,0171 * (chuva) - 1,1421 \quad (19)$$

Em que:

(chuva) o valor em milímetros observado em maio.

SPI' o valor que o SPI teria se sua variação fosse linear.

O intercepto da equação 19 é igual à -1,14, indicando com isso que um valor zero de chuva resultaria em um SPI' moderadamente seco (Quadro 2). Entretanto, nota-se na figura 1 que um milímetro de chuva resultou em um SPI igual a -2,76 (seca severa). Tal fato demonstra que, na escala mensal, o SPI não pode ter seu comportamento aproximado ao linear.

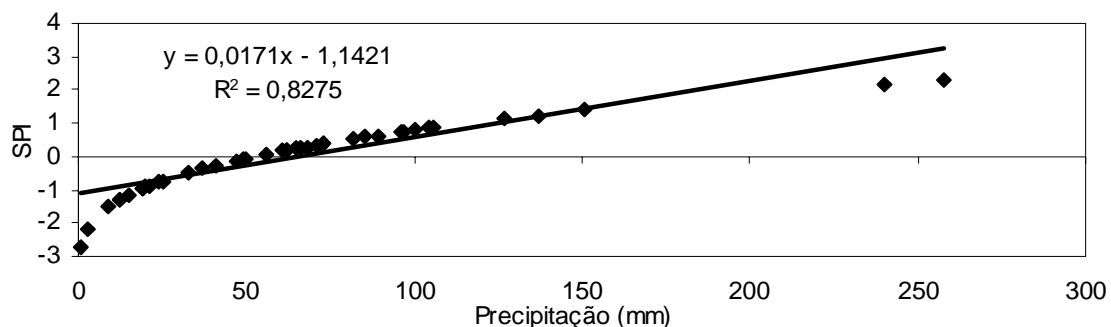


Figura 1. Regressão linear entre o SPI mensal e valores de precipitação. Campinas, maio

Os coeficientes R^2 , gerados pela regressão linear entre o SPI e AH são apresentados na tabela 3.

Como primeira análise da tabela 3, nota-se que os menores valores do coeficiente de regressão ocorreram em períodos "climatologicamente" secos (julho). Tal fato tem sua explicação na maior variabilidade de condições hídricas que o solo pode se encontrar em épocas secas. Assim, torna-se evidente que um mesmo valor do Índice Padronizado de Precipitação na escala mensal, não indica, necessariamente, mesmas condições hídricas do solo em uma dada região. No caso de estudo da seca

agrícola, cujo foco principal é a umidade existente na zona radicular da cultura de interesse, o SPI mensal não deve ser usado com única ferramenta de estudo.

A literatura relaciona o estudo da seca hidrológica a "grandes" períodos de análise hídrica (KARL, 1986 e HEIM JUNIOR, 2002). A alta correlação entre o SPI em base semestral ou anual, em relação à AH acumulada nesses períodos, torna esse índice uma valiosa ferramenta para o monitoramento desse tipo de seca. Na Figura 2 demonstra-se a variação do SPI e de AH em base anual e mensal é demonstrado no período de 1962 a 1964, na localidade de Campinas.

Tabela 3. Coeficientes de regressão linear entre o SPI e AH.

Local	Mês	Coeficiente (R^2) de determinação			
		SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12
Campinas	Janeiro	0,91	0,91	0,95	0,97
Campinas	Março	0,81	0,93	0,95	0,97
Campinas	Julho	0,58	0,67	0,95	0,97
Campinas	Outubro	0,77	0,74	0,83	0,97
Manduri	Janeiro	0,91	0,93	0,95	0,98
Manduri	Março	0,84	0,94	0,96	0,98
Manduri	Julho	0,72	0,81	0,96	0,98
Manduri	Outubro	0,69	0,88	0,85	0,97
Mococa	Janeiro	0,88	0,91	0,96	0,97
Mococa	Março	0,83	0,93	0,96	0,97
Mococa	Julho	0,65	0,86	0,95	0,97
Mococa	Outubro	0,82	0,73	0,85	0,97
Pindorama	Janeiro	0,92	0,86	0,95	0,98
Pindorama	Março	0,85	0,95	0,95	0,97
Pindorama	Julho	0,60	0,84	0,97	0,97
Pindorama	Outubro	0,70	0,78	0,81	0,97
Ribeirão	Janeiro	0,93	0,94	0,98	0,99
Ribeirão	Março	0,77	0,97	0,97	0,98
Ribeirão	Julho	0,68	0,80	0,96	0,98
Ribeirão	Outubro	0,81	0,82	0,92	0,98
Ubatuba	Janeiro	0,97	0,89	0,89	0,98
Ubatuba	Março	0,94	0,97	0,97	0,98
Ubatuba	Julho	0,80	0,94	0,98	0,98
Ubatuba	Outubro	0,97	0,84	0,96	0,99

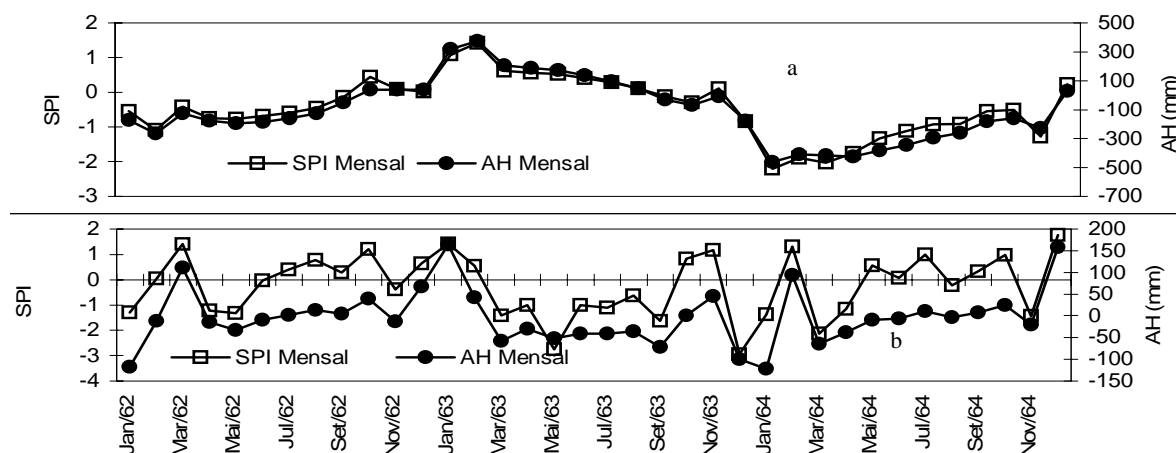


Figura 2. SPI e AH em base anual (a) e mensal (b) entre 1962 a 1964 - Campinas

Devido à grande concordância entre o comportamento do SPI e de AH, em base anual (confirmado pelos altos valores de R^2 apresentado na tabela 3), pode-se afirmar que Índice Padronizado de Precipitação está diretamente relacionado, no Estado de São Paulo, ao excedente hídrico "produzido" em uma região, bacia ou microbacia na escala de tempo acima citada. Tal característica torna o SPI uma valiosa ferramenta no estudo da seca hidrológica.

A comparação de valores do SPI gerados por diferentes períodos de calibração está na tabela 4 para Campinas.

A análise da tabela 4 permite concluir que não há mudanças significativas na magnitude do SPI quando são usados diferentes períodos de calibração. Tal característica permite a comparação de diversos locais com diferentes séries históricas.

Tabela 4. Valores de SPI gerados por diferentes séries de calibração - Campinas.

Período de calibração	R^2	Inclinação	Intercepto	Willmott
1960 a 2003 e	0,98	0,97	-0,002	1,00
1890 a 2003 e	0,95	0,96	-0,03	0,99
1890 a 2003 e	0,98	0,99	-0,03	1,00

Aproximadamente, nas treze localidades, 68% dos valores da SPI situaram-se entre menos um e um e aproximadamente 95% entre dois e menos dois. Tais frequências são explicadas por ser o SPI ajustado à distribuição normal, sendo tais frequências de ocorrência esperadas em qualquer região. Assim, nota-se que esse índice não é capaz de detectar regiões mais sujeitas à seca.

Quanto à avaliação das adaptações do PDSI, dos baixos valores do desvio-padrão (0,70) e do coeficiente de variação (3,1%), constantes no estudo do produto DK' pela metodologia adaptada, verifica-se que o fator K uniformizou (padronizou) o desvio-médio (D) dos valores observados de precipitação pluvial nas diferentes regiões do Estado de São Paulo. Tal característica resulta em uma maior confiabilidade do PDSI adaptado em relação ao PDSI como ferramenta de comparação de condições hídricas de diferentes locais no Estado de São Paulo.

O coeficiente R^2 , gerado pela regressão linear entre índices Z acumulados e seus respectivos números de meses de ocorrência para os períodos base da equação 14, foi de 0,91. Esse alto valor alerta que o PDSI adaptado é um quantificador de seca padronizado no tempo e no espaço, podendo ser comparado em diferentes épocas e em diversos locais do Estado de São Paulo.

Os coeficientes R^2 entre PDSI, PDSI adaptado e AH são apresentados na tabela 5.

O PDSI adaptado, comparado a valores de AH, melhorou significativamente na magnitude de R^2 , quando comparado com o PDSI. Em tais valores constatou-se ainda a grande sensibilidade do índice adaptado a mudanças no regime hídrico de uma

região independente do mês em estudo. Essa sensibilidade torna o PDSI adap uma ferramenta que "quantifica" as condições hídricas de uma região na escala mensal. Tal diferença de sensibilidade pode ser entendida ao comparar-se a equação 5 do método original à equação 14 do PDSI adap. Nessa primeira, apenas um terço do déficit atual de precipitação Z e quase nove décimos do valor do PDSI do mês precedente são considerados, enquanto que nessa última Z tem seu peso "acrescido" em 6,4% e apenas 1,5 décimos do valor do PDSI adap do mês precedente é considerado. Por esse motivo, a equação 14 não apresenta a memória exagerada inerente ao PDSI original.

O estudo dos valores limites -1 e -0,5 é apresentado na tabela 6.

Houve resultados pouco satisfatórios do valor limite -1 apresentou para a localidade de Tatuí em 1961 e 2003 e para Campinas em 2003. Já para o valor limite -0,5 apresentou resultados satisfatórios em todas as localidades e em todos os períodos. Nota-se ainda, por meio do índice de concordância de Willmott, que a P_{esp} calculada com base no valor limite -0,5 trouxe a relação ETR/ETP próxima ao valor climatologicamente esperado para o mês em questão nas regiões consideradas. Assim, o valor de -1 foi escolhido como patamar de início (quando o índice cai abaixo deste, isto é, as condições hídricas atuais

estão consideravelmente abaixo das que seriam esperadas) e o valor de -0,5 como patamar final de uma seca (quando o índice o alcança ou o supera). Tal característica torna o PDSI adap uma ferramenta adaptada ao monitoramento hídrico de uma região em tempo real, pois dispensa o uso da equação 7. Esse fato, aliado à determinação da escala de tempo inerente ao novo índice (escala mensal), concorda com as críticas feitas por ALLEY (1984), KARL (1986) e HAYES et al (1999) sobre as quais afirmam que, por usar regras arbitrárias para definição do início ou do fim de uma seca e por não possuir uma escala de tempo de análise definida, o PDSI é de difícil interpretação de seus resultados.

Pela figura 3, verifica-se o estudo do comportamento do PDSI, PDSI adap e de AH em 1963/64 para a região de Campinas (SP).

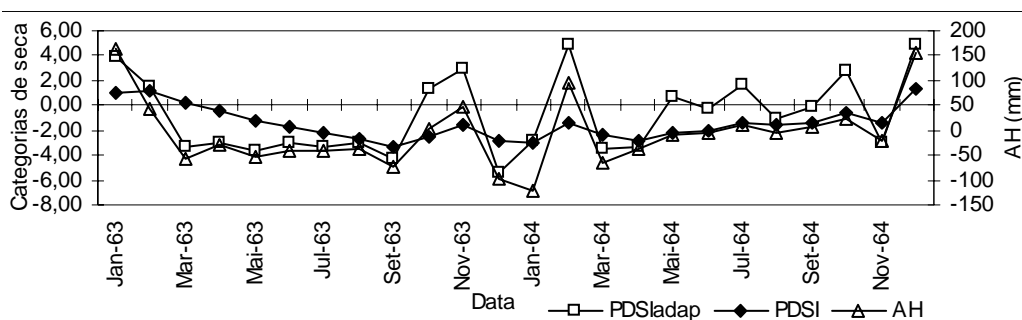
Analisando a Figura 1 nota-se que o PDSI cai abaixo do valor de -1 em maio de 1963, ao passo que no mesmo período, o PDSI adap já indicava com dois meses de antecedência valores bem abaixo do estabelecido como limite do início de uma seca (-1), permitindo com isso a adoção mais rápida de medidas de combate à seca. Nota-se ainda maior semelhança na variação de AH e do PDSI adap em relação ao de AH e do PDSI. Na tabela 6 são demonstradas as novas categorias definidas com base no valor limite utilizado como indicativo de seca extrema (-3).

Tabela 5. Coeficiente de regressão linear entre AH e PDSI e AH e PDSI adap,

Local	Coeficiente de determinação							
	Janeiro		Março		Julho		Outubro	
	PDSI	PDSIadap	PDSI	PDSIadap	PDSI	PDSIadap	PDSI	PDSIadap
Campinas	0,52	0,84	0,45	0,89	0,44	0,78	0,27	0,86
Jaú	0,47	0,90	0,45	0,92	0,33	0,91	0,31	0,76
Mococa	0,29	0,81	0,53	0,93	0,44	0,84	0,58	0,83
Piracicaba	0,50	0,91	0,49	0,86	0,34	0,86	0,37	0,83
Rib.Preto	0,20	0,87	0,15	0,90	0,44	0,86	0,55	0,80
Tatuí	0,40	0,80	0,41	0,92	0,31	0,91	0,37	0,75
Jundiaí	0,24	0,91	0,21	0,96	0,10	0,81	0,17	0,75
Manduri	0,14	0,95	0,10	0,95	0,50	0,97	0,24	0,96
MteAlegre	0,28	0,95	0,28	0,94	0,22	0,85	0,20	0,75
Pariquera	0,38	0,81	0,47	0,94	0,24	0,86	0,24	0,81
Pindorama	0,48	0,79	0,37	0,90	0,45	0,87	0,33	0,80
Ubatuba	0,14	0,94	0,11	0,95	0,50	0,97	0,24	0,96

Tabela 6. Índice de concordância de Willmott e coeficiente R^2 entre a relação ETR/ETP média e a relação ETR/ETP gerado por P esp para os valores limites de menos um e menos meio.

Local	Ano	Valor Limite			
		-0,5		-1	
		R^2	Willmott	R^2	Willmott
Campinas	1963	0,92	0,93	0,84	0,68
Campinas	2003	0,81	0,93	0,80	0,58
Jaú	1963	0,97	0,90	0,92	0,94
Jaú	2003	0,83	0,84	0,80	0,63
Mococa	1961	0,91	0,94	0,88	0,87
Mococa	1963	0,95	0,97	0,90	0,89
Mococa	2003	0,97	0,92	0,94	0,83
Piracicaba	1961	0,85	0,90	0,79	0,74
Piracicaba	1963	0,97	0,85	0,93	0,97
Piracicaba	2003	0,85	0,80	0,85	0,65
Rib.Preto	1961	0,95	0,98	0,95	0,93
Rib.Preto	1963	0,93	0,89	0,95	0,98
Tatuí	1961	0,90	0,90	0,80	0,58
Tatuí	1963	0,80	0,80	0,51	0,43

**Figura 3.** Variação do comportamento de AH, PDSI e PDSI adap para a localidade de Campinas (SP), em 1963/64.**Tabela 7.** Novas categorias do PDSI adap

PDSI adap	CATEGORIA
$\geq 3,00$	Extremamente Úmido
2,00 a 2,99	Severamente Úmido
1,00 a 1,99	Moderadamente Úmido
0,51 a 0,99	Início período Úmido
0,50 a -0,50	Próximo ao Normal
-0,51 a -0,99	Início período Seco
-1,00 a -1,99	Moderadamente Seco
-2,00 a -2,99	Severamente Seco
$\leq -3,00$	Extremamente Seco

3. CONCLUSÃO

As adaptações realizadas no método descrito por PALMER (1965) produziram novo índice (PDSI adap) consistente para o monitoramento rotineiro da seca meteorológica no Estado de São Paulo. Com a aplicação do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) permite-se quantificar e monitorar um déficit hídrico em diferentes escalas de tempo, podendo ser de curta duração (mensal, seca meteorológica) ou de longa duração (anual, seca hidrológica ou socioeconômica).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. Meteorological drought: policy statement. **Bulletin of the American Meteorology Society**, Boston, v. 78 p.847-849, 1997.
- ALLEY, W.M. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v.23, p. 1100-1366.
- BRUNINI, O., BLAIN, G. C., BRUNINI, A. P., SANTOS, R. L., BRIGANTE, R. S., ALMEIDA, E. L: Avaliação do Índice de Severidade de Seca de Palmer para a Quantificação da Seca Agrícola no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. p. 1140-1147. (CD-ROM)
- DRACUP, J.A.; LEE, K.S.; PAULSON, G. On the definitions of droughts. *Water Resurces Research*, Washington, v.16, n.2, p.297 - 302, 1980.
- GUTTMAN, G.B. Comparing the Palmer Drought Index and the "Standardized Precipitation Index". **Journal of the American Water Resources**, Washington, v.16, n.2, p. 113-121, 1998.
- GUTTMAN, G.B. Accepting the "Standardized Precipitation Index " : A calculation algorithm. Index. **Journal of the American Water Resources**, Washington, v.35, n.2, p. 311-322, 1999.
- HAYES, M. J.; SVOBODA, M.D.; WILHITE, D.A.; VANYARKHO, O.V, Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 80, n. 3, p.429-438, 1999.
- HEIM JUNIOR, R. R, A review of twentieth - century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83, n.8, p.1149-1163, 2002.
- KARL, T. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potencial evapotranspiration. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v.25, p. 77-86, 1986.
- KEYANTASH, J. DRACUP, J.A, The quantification of drought: An evaluation of drought indices. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83 n.8, p.1167-1180, 2004.
- MCKEE,T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST,J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Boston. **Anais...** Boston: American Meteorological Society, 1993. p.179-184. (Preprints)
- MCKEE,T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST,J. Drought monitoring with multiple times scales. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 9., 1995, Boston. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1995. p.233-236. (Preprints)
- OLAPIDO, E.O. Acomparative performance analysis of three meteorological drought indexes. **Journal of Climatology**, Chichester, v.5, p. 655-664, 1985.
- PALMER, W.C. Meteorological drought. Washington, 1965. 58p. (US Weather Bureau Res. Nº 45)
- RASMUSSEN, E.M., DICKINSON, R.E., KUTZBACH, J.E., CLEAVELAND,M.K. Climatology. In: MAIDMEMT, D.R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. cap. 2, p.1-44
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955, 104 p. (Publications in Climatology, v.8, n.1)
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: The role definitions. In: WILHITE et al. **Planning for drought toward a reduction of societal vulnerability**. Colorado: Westview, 1987. cap. 2, p. 11-14.
- WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: conceptions and definitions. In: WILHITE, D. A. **Drought: a global assessment**. London: Routledge, 2000. p. 3-18.
- WILLMOTT, C.J.,ACKLESON,S.G.,DAVIS,J.J., FEDDEMA,K.M.,KLINK,D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v .90, n..5, p. 8995-9005, 1985.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Drought and agriculture**. Geneva, Switzerland, 1975. 127 p. (WMO Tech. Note 138, Publ. WMO-392)