



**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**

GABRIEL CONSTANTINO BLAIN

Campinas

2005

GABRIEL CONSTANTINO BLAIN

**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**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agronômico de Campinas, na Área de Concentração Gestão de Recursos Agroambientais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Orivaldo Brunini

Campinas

2005

B573a Blain, Gabriel Constantino

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 / Gabriel Constantino Blain. Campinas: Instituto Agrônômico, 2005.

120f. :il

Orientador: Prof. Dr. Orivaldo Brunini.
Dissertação (mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) - Instituto Agrônômico de Campinas.

1. Tipos de seca. 2. Déficit de Precipitação. 3. Escalas de Tempo. 4. Monitoramento. 5. Tempo real I. Brunini, Orivaldo. II. Instituto Agrônômico de Campinas. III Título

CDD – 632.12

GABRIEL CONSTANTINO BLAIN

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

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agrônômico de Campinas, na Área de Concentração Gestão de Recursos Agroambientais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Orivaldo Brunini
Instituto Agrônômico-IAC

Prof. Dr. Clovis Alberto Volpe
Universidade Estadual Paulista/ UNESP

Prof. Dr. Emílio Sakai
Instituto Agrônômico-IAC

Campinas, ____ de _____ de 2005.

A Deus, aos meus pais Maura e Sérgio, ao
avô Dante e a avó Geny,

DEDICO

A meu irmão Otávio e sua esposa
Bianca, as minhas tias Claudette e
Adriana pela força nos momentos
mais difíceis.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

- Ao Dr Orivaldo Brunini, pela orientação, paciência e incentivo.
- Aos pesquisadores Ângelo Paes de Camargo, Marcelo Bento Paes de Camargo, Mário José Pedro Junior, Josalba Vidigal de Castro, Wanderley Antônio Tremocoldi e Ana Maria M. A. Lagoa, pela amizade.
- A Carmencita Ciarelli Bruninni, pelo apoio e amizade.
- A Romilson César Moraes Yamamura pelo apoio e amizade.
- Aos Amigos Alisson Fernando Chiorato, Alan Gomes da Silva, Anderson da Cruz Pereira, Andrew Patrick Ciarelli Brunini, Ricardo Luis dos Santos, Valdeir Biudes Hermoso, Ellen Loregian de Almeida, Ludmila Bardin, Rodrigo Sarpa Brigante, Jorge Lulu, Denise Regina da Silva Abreu, Ricardo José Macedo Pezzopane e Emerson Alves da Silva, pela amizade.
- Ao Centro de P&D de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agrônomo, pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.
- A Pós-Graduação do Instituto Agrônomo pela oportunidade concedida para a realização do curso.
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

BLAIN, Gabriel C. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. 2005. Dissertação (Mestrado Em Agricultura Tropical E Subtropical) – Instituto Agrônômico de Campinas.

RESUMO

Um passo importante na análise científica do fenômeno seca é a determinação exata de seu significado. Entretanto, não existe um conceito válido para todas as atividades afetadas por essa anomalia. A literatura apresenta definições de diferentes “tipos de seca” relacionados à atividade em estudo entre esses, a seca meteorológica, a agrícola, a hidrológica e a socioeconômica são os mais citados. Comum a todos os tipos é o fato de serem originários de um déficit na precipitação pluvial, sendo o tempo requerido, de ocorrência de tal deficiência, que separa os diferentes conceitos desse fenômeno climático. Vários indicadores têm sido utilizados para quantificar, padronizar e comparar a seca em base espacial e temporal; entre esses os mais conhecidos são o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e o Índice Padronizado de Precipitação (SPI). O PDSI acusa o início de uma seca quando a precipitação de uma região diminui consideravelmente em relação a que seria climatologicamente esperada. Tal déficit é ponderado por um fator K de caracterização climática. Baseado no ajuste de séries de precipitação à distribuição gama, o 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 os parâmetros do Balanço Hídrico Climático de um determinado período, apresentavam em relação aos valores climatologicamente esperados dos mesmos, para o intervalo de tempo em questão. O SPI teve seus resultados analisados em diversas escalas de tempo (1, 2, 3, 6, 9, 12 e 24 meses). Por meio dos testes do qui-quadrado e do Komolgorov-Smirnov, a aderência das séries de precipitação mensal, das localidades em questão à distribuição gama, também foi avaliada. O ajuste do PDSI teve como foco principal o fator K e a própria equação final do índice. As análises permitiram concluir que, por detectar o início de uma seca com pelo menos um mês de antecedência em relação ao modelo original, o PDSI adap é uma ferramenta consistente para o monitoramento, próximo ao tempo real, da seca meteorológica, na escala mensal. O SPI também demonstrou ser uma metodologia apropriada para a quantificação do déficit de precipitação, em diversas escalas de tempo, no Estado de São Paulo, por otimizar o tempo de identificação de condição emergentes dessa anomalia climática. Ambos os índices devem, portanto, ser utilizados em decisões governamentais de planos de combates aos efeitos do fenômeno natural seca.

Palavras Chave: tipos de seca; déficit na precipitação; escalas de tempo; monitoramento; tempo real, anomalia climática.

BLAIN, Gabriel C. 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. 2005. Dissertação (Mestrado Em Agricultura Tropical E Subtropical) – Instituto Agrônômico de Campinas.

ABSTRACT

An essential step in a scientific analysis of drought is to clearly define what is meant by this term. However, there is no suitable definition of drought for all human activities. Drought is frequently defined according to disciplinary perspective, and these definitions are clustered into four types: meteorological, agricultural, hydrological and socioeconomic. The time period from the input of precipitation until water becomes available for each active differs. Consequently, the time scale over which accumulate precipitation deficits becomes important and separates different types of drought. Several drought indices have been developed to analyze drought severity on spatial and temporal basis. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) has been used in many countries such USA and Europe. A drought event for the PDSI is defined as a period of time during which the actual moisture supply at a given place rather consistently falls short of the climatologically appropriate moisture supply. This rainfall precipitation deficiency is weighted by the K factor. Based on historical precipitation series fitted to the gamma distribution, the Standardized Precipitation Index (SPI) is another drought index that recognize the importance of time scale in the analysis of water availability and water management. Based on parameters of the water balance of thirteen regions of the São Paulo State, the scope of this study was to test and to adapt the PDSI and the SPI to the climatologically conditions of the State. Each data set of monthly precipitation were perfectly fitted to the gamma function as indicated by the K-S and the χ^2 tests. The main focus of the adaptation for the PDSI was 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. The "new index" detected the onset of a drought at least one month in advance compared to the original PDSI. The SPI model also demonstrated to be a consistent "precipitation deficits monitoring tool" for the State. The use of the SPI improves the timely identification of emerging drought conditions. Both indices should, therefore, be used as part of a overall state government actions to drought affected regions and mitigation policy.

Key Words: definition of drought; precipitation deficits; times scales; monitoring tool; real time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Campinas – SP nos anos de 1963/64	74
Figura 2 - Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Jaú – SP nos anos de 1963/64.....	75
Figura 3 - Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Mococa (a), Piracicaba (b), Ribeirão Preto (c) e Tatuí (d) nos anos de 1963/64.....	76
Figura 4 - Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Pariquera-Açú (a), Monte Alegre do Sul (b), Pindorama (c) e Ubatuba (d) nos anos de 1963/64.....	77
Figura 5 - Frequência de ocorrência média das classes arbitrárias do PDSI adap para as localidades base desse estudo.....	80
Figura 6 - Frequência de ocorrência das classes arbitrárias do PDSI adap para as localidades de Campinas (a), Jaú (b), Ribeirão Preto (c) e Tatuí (d).....	81
Figura 7 - Equação da reta de tendência e coeficiente de determinação entre valores do SPI 1 e valores de precipitação que os geraram para as localidades de Campinas (a), Piracicaba (b), Ubatuba (c) e Votuporanga (d) no mês de Maio.....	87
Figura 8 - Equação da reta de tendência e coeficiente de determinação entre valores do SPI 3 e valores de precipitação que os geraram para as localidades de Campinas (a), Piracicaba (b), Ubatuba (c) e Votuporanga (d) no mês de Maio.....	89
Figura 9 - Variação do coeficiente de determinação R^2 entre o SPI e os respectivos valores de precipitação em relação ao aumento da escala de tempo de estudo para as localidades de Campinas, Jaú, Mococa, Ribeirão Preto e Tatuí nos meses de Março (a) Julho (b), Outubro (c) e Dezembro (d)	94
Figura 10 - Variação do coeficiente de regressão R^2 entre o SPI e os respectivos valores de precipitação em relação ao aumento da escala de tempo de estudo para as localidades de Jundiaí, Mandurí, Pindorama e Ubatuba nos meses de Março (a) Julho (b), Outubro (c) e Dezembro (d).....	95
Figura 11 - Comportamento do SPI 1 e do AH para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f).....	97
Figura 12 - Comportamento do SPI 1 e do AH para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Monte Alegre Sul (a), Pariquera-açú (b), Pindorama (c) e Ubatuba.....	98

Figura 13 - Comportamento do SPI 12 e do AH acumulado para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f)	99
Figura 14 - Frequência de ocorrência das classes de secas definidas pelo SPI nas seis localidades base desse estudo.....	101
Figura 15 - Variação do coeficiente de determinação entre o PDSI e SPI e entre PDSI adap e SPI em diferentes escalas de tempo para as de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f)	107
Figura 16- Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do PDSI – Outubro de 2004	116
Figura 17- Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do PDSI adap – Outubro de 2004.....	118
Figura 18- Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do SPI 1 – Outubro de 2004.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).....	33
Tabela 2 – Valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e Categorias de seca ou de umidade.....	39
Tabela 3 – Relação dos postos utilizados e suas respectivas séries históricas.....	47
Tabela 4 – Valores arbitrários de t, x_i, x_{i-1} e Δx	52
Tabela 5 – Cálculo de AH para a localidade de Campinas no período de 1963/64.....	57
Tabela 6 – Diferentes períodos de calibração para estimativa de valores do SPI nas regiões de Campinas, Mandurí e Pindorama.....	63
Tabela 7 – Coeficiente de determinação gerado por regressões lineares entre AH e o PDSI, AH e x , AH e X' , AH e X e, AH e PDSI adap para as seis localidades consideradas base.....	68
Tabela 8 – Coeficiente de determinação gerado pela regressão linear entre AH e PDSI adap e entre AH e PDSI para as demais localidades utilizados nesse estudo.....	69
Tabela 9 – Coeficiente de determinação gerado pela regressão linear entre AH e PDSI e AH e PDSI adap, separados por meses iguais.....	70
Tabela 10 – Índice de concordância de Willmott e coeficiente R^2 de determinação 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.....	71
Tabela 11 – Novas categorias do PDSI adap.....	79
Tabela 12 – Média mensal de precipitação (mm) e frequência de ocorrência da mesma para a região de Campinas.....	83
Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores do SPI, para a região de Campinas.....	85
Tabela 14 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores do SPI, para a região de Ubatuba.....	86
Tabela 15 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores es do SPI, para a região de Votuporanga.....	86
Tabela 16 – Coeficientes de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre SPI e AH agrupados por meses iguais em diferentes escalas de tempo.....	91

Tabela 17 – Coeficientes de determinação (R ²) da equação de regressão linear entre SPI e AH agrupados por meses iguais em diferentes escalas de tempo.....	92
Tabela 18 – Condições hídricas estimadas do solo nos anos de 1976 e 1989 (Junho e Julho) na região de Campinas.....	93
Tabela 19 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Campinas por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.....	100
Tabela 20 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Mandurí por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.....	100
Tabela 21 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Pindorama por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.....	101
Tabela 22 – Coerência entre o índice Z de anomalia hídrica e o SPI nos 6 locais base desse estudo nos anos de 1963, 1982 e no período entre 1960 e 2003.....	103
Tabela 23 – Precipitação observado, precipitação média e anomalia para a região noroeste do Estado de São Paulo – Outubro de 2004.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Gamma(\alpha)$	Função Gama (adimensional).
(Exd – Def) Média	Média Mensal de “Exc – Def” (mm).
σ_1	Desvio padrão da série histórica de precipitação pluviométrica na escala em estudo (mm).
A	Fator da distribuição Gama (adimensional)
AH	Diferença entre “Exc – Def” e “(Exd – Def) Média” (mm).
Arm	Armazenamento de água no solo estimado pelo método do Balanço Hídrico Climático segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
<i>c</i>	Coefficiente da equação de Abramowitz e Stegun, (1965) (adimensional) (adimensional)
ArmMax	Capacidade máxima de água retida no volume de solo considerado (armazenamento máximo) (mm).
CAFEC	Valores climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).
d	Anomalia de precipitação mensal (mm).
D	Média dos valores absolutos de d (mm).
<i>d</i>	Coefficiente da equação de Abramowitz e Stegun, (1965) (adimensional)
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
Def	Deficiência hídrica estimada pelo método do Balanço Hídrico Climático segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
d_{esp}	Valor de d necessário para terminar uma seca (mm).
D_{max}	Teste Kolmogorov – Smirnov (adimensional)
ET	Valores da Evapotranspiração Potencial Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).
ETP	Evapotranspiração Potencial estimada pelo método de Camargo (1983) (mm).
<i>ETP</i>	Média Mensal da Evapotranspiração Potencial segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
ETR	Evapotranspiração Real estimada pelo método do Balanço Hídrico Climático segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
<i>ETR</i>	Média Mensal da Evapotranspiração Real segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
ETR/ETP	Razão entre a Evapotranspiração Real e a Evapotranspiração Potencial na escala mensal (mm).
(Exc – Def)	Diferença entre o valor do excedente e da deficiência hídrica em um determinado mês e local (mm).
Exd	Excedente hídrico estimado pelo método do Balanço Hídrico Climático segundo metodologia de Thorntwaite & Mather (1955) (mm).
F(x) a	Função distribuição de probabilidade empírica de valores de precipitação pluvial (adimensional)

$F'(x)$ a	Função distribuição de probabilidade teórica de valores de precipitação pluvial (adimensional)
f_a	Frequência acumulada das cada classe de valores de precipitação pluvial (adimensional)
f_{e_i}	frequência esperada de valores de precipitação pluvial (adimensional)
f_{o_i}	frequência observada de valores de precipitação pluvial (adimensional)
$H(x)$	Probabilidade cumulativa de ocorrência de um dado valor de precipitação (adimensional)
IAC	Instituto Agrônômico
k	Primeiro ajuste do fator de caracterização climática da metodologia do PDSI (adimensional)
K	Ajuste final do fator de caracterização climática da metodologia do PDSI (adimensional)
a	Número de intervalo de valores de precipitação pluvial (adimensional)
K'	Segundo ajuste do fator de caracterização climática da metodologia do PDSI (adimensional)
L	Valores de perda de água do solo Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).
L	Média Mensal da Perda de água do solo (mm).
L	Valores de perda de água no solo (mm).
\ln	Logarítmo neperiano (adimensional)
L_s	Valores de perda de água na camada superficial do solo (mm).
L_u	Valores de perda de água na camada sub-superficial do solo (mm).
m	Número de observações com chuva igual a zero
n	Número de observações com chuva maior do que zero
n_o	Número de classes de valores de chuva pre-estabelecidos
NDMC	National Drought Mitigation Center
P	Valores de precipitação Mensal (mm).
P	Valores de precipitação Climatologicamente Apropriados para as Condições Existentes (mm).
PDSI	Índice de Severidade de Seca de Palmer (adimensional)
PDSI adap	Adaptação final do Índice de Palmer para o Estado de São Paulo (adimensional)
P_e	Porcentagem de Probabilidade que um período estabilizado tenha terminado (%)
P_{esp}	Valor de P necessário para terminar uma seca (mm).
PL	Perda de água do solo Potencial (mm).
PL	Média Mensal da Perda de água do solo Potencial (mm).
PL	Perda Potencial de água no solo (mm).
Pl_s	Perda Potencial de água na camada superficial do solo (mm).
Pl_u	Perda Potencial de água na camada sub-superficial do solo (mm).
PR	Recarga hídrica Potencial (mm).
PR	Média Mensal da Recarga hídrica Potencial (mm).
PRO	Escoamento Superficial Potencial (mm).
PRO	Média Mensal do Escoamento Superficial Potencial (mm).
q	Probabilidade de ocorrência do valor zero de precipitação (mm).
R	Recarga hídrica Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).

R	Média Mensal da Recarga hídrica (mm).
R^2	Coefficiente de determinação (adimensional)
RO	Escoamento Superficial Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).
RO	Média Mensal do Escoamento Superficial (mm).
SPI	Índice Padronizado de Precipitação (“Standardized Precipitation Index”,SPI) (adimensional)
SPI 1	Valores do Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala mensal (adimensional)
SPI 3	Valores do Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala trimestral (adimensional)
SPI 6	Valores do Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala semestral (adimensional)
SPI 9	Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala de nove meses (adimensional)
SPI 12	Valores do Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala anual (adimensional)
SPI 24	Valores do Índice Padronizado de Precipitação calculado na escala Bienal (adimensional)
Ss	Armazenamento de água na camada superficial do solo (mm).
Su	Armazenamento de água na camada sub-superficial do solo (mm).
T	Razão entre a demanda e o suprimento de água em um determinado mês e local (adimensional)
t	Número de meses do período considerado
U	Umidade efetiva (adimensional)
X	Valor mensal do Índice de Palmer Original (adimensional)
x	Primeira adaptação do Índice de Palmer para o Estado de São Paulo (adimensional)
X	Terceira adaptação do Índice de Palmer para o Estado de São Paulo (adimensional)
X'	Segunda adaptação do Índice de Palmer para o Estado de São Paulo (adimensional)
X1	Período úmido que está se estabilizando (adimensional)
X2	Período seco que está se estabilizando (adimensional)
X3	Período seco ou úmido estabilizado (adimensional)
Z	Índice de Anomalia hídrica (mm).
z	Índice de Anomalia hídrica calculado com base no fator k (mm).
Z	Índice de Anomalia hídrica calculado com base no fator K (mm).
Z'	Índice de Anomalia hídrica calculado com base no fator K' (mm).
Ze	Índice de Anomalia hídrica requerido para terminar um período estabilizado em 1 mês (mm).
Z _{esp}	Valor de Z necessário para terminar uma seca (mm).
α	Coefficiente de Evapotranspiração da metodologia de Palmer (1965) (adimensional)
α	Parâmetro de forma da função Gama (adimensional)
β	Coefficiente de Recarga hídrica da metodologia de Palmer (1965) (adimensional)
β	Parâmetro de escala da função Gama (adimensional)
γ	Coefficiente de Escoamento Superficial (Runoff) da metodologia de

δ	Palmer (1965) (adimensional) Coeficiente de Perda de água do solo da metodologia de Palmer (1965) (adimensional)
Δx	Varição da primeira adaptação do Índice de Palmer para o Estado de São Paulo em dois períodos considerados (adimensional)
Δz	Varição do Índice de Anomalia hídrica para o Estado de São Paulo em dois períodos considerados (mm).
X^2	Teste qui-quadrado (adimensional)

SUMÁRIO

1	16
INTRODUÇÃO.....	
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Definição de Seca.....	20
2.2 Índice de Severidade de Seca de Palmer e Índice Padronizado de Precipitação.....	23
2.2.1 Índice de Severidade de Seca de Palmer.....	24
2.2.2 Índice Padronizado de Precipitação.....	35
2.3 Estudos no Estado de São Paulo.....	41
2.4 Distribuição Gama.....	45
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1 Material.....	47
3.2 Métodos.....	48
3.2.1 Balanço Hídrico climatológico.....	48
3.2.2 Adaptação do PDSI às condições climáticas do Estado de São Paulo.....	49
3.2.3 Avaliação das adaptações do PDSI.....	56
3.2.4 Determinação do início e do fim de uma seca de acordo com o PDSI adap.....	58
3.2.5 Avaliação da metodologia base do SPI (teste de aderência).....	60
3.2.6 Comparação do comportamento do SPI e da Anomalia Hídrica (AH).....	63
3.2.7 Estudo da influência de mudanças no período de “calibração” do SPI.....	63
3.2.8 Análise da frequência de ocorrência das categorias de Seca definidas pelo SPI.....	64
3.2.9 Comparação entre a metodologia do PDSI adap e a do SPI.....	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65

4.1 Análise das Adaptações do Índice de Severidade de Seca de Palmer.....	65
4.2 Determinação do Início/Fim de Uma Seca de Acordo com o PDSI adap.....	71
4.3 Classes de Seca do PDSI adap.....	79
4.4 Avaliação do SPI.....	84
4.5 Comparação Entre o PDSI adap e o SPI.....	10
4.6 Limitações e Vantagens do SPI e do PDSI adap.....	8
5 CONCLUSÃO.....	11
REFERÊNCIAS.....	0
..	11
..	2
APENDICE A – USO DO PDSI, DO PDSI adap E DO SPI NO MONITORAMENTO HÍDRICO DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	11
PAULO.....	6

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno meteorológico complexo, com influências sociais freqüentemente agravadas pela ação humana. A ocorrência dessa anomalia climática em várias regiões do globo terrestre na década de setenta evidenciou a vulnerabilidade¹ do homem a esse risco climático, demonstrando a necessidade de um melhor entendimento, de uma melhor previsão de sua ocorrência e do uso correto de medidas mitigatórias (WILHITE et al.,1987).

Apesar de ser tema de diversos trabalhos científicos, não existe, segundo Mckee et al. (1993) uma definição de seca válida para qualquer região, em qualquer época e ainda adequada a todas as ramificações das sociedades humanas.

Esse fato é evidenciado por Wilhite et al. (1987) ao afirmarem que pesquisadores, políticos, agricultores, ou cidadãos comuns, têm percepções diferentes do fenômeno seca. Até mesmo dentro de cada um desses grupos, há diferenças significativas no entendimento dessa anomalia climática. Um meteorologista, ou um sociólogo, por exemplo, vêem a seca como problemas distintos. O primeiro está preocupado com a previsão ou explicação das causas desta anomalia ou ainda em descrever a magnitude do déficit de precipitação ocorrido, ao passo que o segundo está mais interessado nos efeitos dessa deficiência nas pessoas ou nas instituições.

¹ Grau que um sistema é susceptível, ou incapaz de enfrentar efeitos adversos. É uma função entre a natureza, a magnitude e o percentual de uma variação que o sistema é exposto, sua sensibilidade, sua capacidade adaptativa. Depende, ainda, de uma relação complexa de situações econômicas, sociais, culturais e políticas, que são configuradas por eventos extremos já enfrentados por determinadas sociedades (IPCC,2001)

Segundo Heim Junior (2002) o grande número de setores afetados pela seca, sua diversidade geográfica, sua distribuição temporal e a demanda provocada pela ação humana tornam difícil o desenvolvimento de uma definição universal desse evento.

Tal confusão na definição desse fenômeno natural, pode resultar em uma falta de entendimento das reais implicações sociais de uma seca, tornando ineficazes as medidas de combate a essa anomalia climática (WILHITE et al., 1984).

Sansigolo (2004) citando Dracup et al e Olapido, exemplifica quatro definições de seca baseadas em considerações meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e econômicas: seca meteorológica, refere-se a precipitação pluviométrica abaixo das normais esperadas; secas hidrológicas e agrícolas referem-se, respectivamente, a níveis de rios e reservatórios abaixo do normal e a umidade do solo insuficiente para suprir a demanda das plantas, já a seca econômica ocorre quando o déficit de água induz à falta de bens ou serviços (energia elétrica ou alimentos, por exemplo) devido ao volume inadequado, à má distribuição das chuvas, ao aumento no consumo, ou ainda ao mal gerenciamento dos recursos hídricos.

Além de estar relacionado à duração, intensidade e extensão geográfica, um episódio de seca depende da “demanda por água” requerida pelas atividades humanas e pela vegetação da região em questão. Wilhite et al. (1987) afirmam que o estudo da seca não deve ser separado do contexto social.

Devido a todos esses fatos, vários indicadores têm sido utilizados para quantificar, padronizar e comparar a seca em base temporal e espacial; entre eles o mais conhecido é o

Índice de Severidade de Seca de Palmer (“Palmer Drought Severity Index”, 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), o qual foi desenvolvido por Mckee et al. (1993 e 1995) e é a única ferramenta conhecida capaz de quantificar ou monitorar a seca em diferentes escalas de tempo. Para Mckee et al. (1993 e 1995) tais escalas, ao serem relacionadas ao déficit de precipitação, tornam-se extremamente importantes para caracterizar 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.

O estudo de um caso de seca nos Estados Unidos da América do Norte (EUA) ocorrida nas planícies do sul desse país em 1996 permitiu constatar que o SPI detectou seu início com pelo menos um mês de antecedência em relação ao Índice de Palmer. Esse fato é de suma importância na mitigação e em ações estaduais e federais de combate ao efeito dessa anomalia climática (HAYES et al., 1999).

Brunini et al., (2002a) 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 frequentemente castigada por adversidades climáticas, sendo a seca a que apresenta efeito mais duradouro e de maior intensidade.

O racionamento de energia elétrica, devido ao baixo nível dos reservatórios ocorrido em várias regiões do Brasil em 2001, é mais um exemplo da vulnerabilidade da sociedade brasileira a essa anomalia climática. Nesse ano foram demonstradas implicações hidrológicas e socioeconômicas do fenômeno natural seca.

A implementação de sistemas de monitoramento em “tempo real” e “estações de aviso” são, segundo Wilhite (1982), a única forma dos “estudiosos da atmosfera” contribuírem com as ações de combate à seca nos Estados Unidos da América do Norte.

Tais contribuições poderiam ser feitas por meio de estudos realizados sobre índices utilizados para quantificar as condições hídricas das áreas em questão. No caso de tais ferramentas proverem informações inadequadas ou imprecisas, devem ser re-avaliados ou até mesmo substituídas por novos índices (WILHITE, 1982).

Tendo em vista os fatos acima citados, o uso de ferramentas, avaliadas e adaptadas nas condições climáticas do Estado de São Paulo, que auxiliem no monitoramento de um possível déficit de precipitação, pode ser extremamente importante na adoção de medidas de combate à seca no espaço geográfico em questão. 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 & 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.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definição de Seca

O primeiro passo em uma análise científica é definir e especificar os componentes do problema sob investigação. 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 a 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 de se realizar (DRACUP et al., 1980).

Segundo o dicionário Aurélio, seca é a falta de chuva ou o período em que a ausência dessa acarreta graves problemas sociais. Palmer (1965) considera seca como o intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até mesmo de anos, durante o qual a precipitação diminui consideravelmente em relação ao valor climatologicamente esperado ou apropriado.

Tal fenômeno pode ocorrer tanto em áreas úmidas ou áridas. É um estado relativo a uma condição média do balanço entre a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração em uma determinada área (WILHITE et al., 1987).

A maior parte dos trabalhos científicos reconhecem quatro tipos de seca: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica (WILHITE et al., 1987 e RASMUSSEN et al., 1993).

Keyantash e Dracup (2002) 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.

A seca meteorológica é o resultado de um déficit de precipitação, já a hidrológica é uma deficiência no volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios (WILHITE, 2000). O primeiro tipo de seca pode se desenvolver rapidamente e “terminar abruptamente” enquanto a hidrológica necessita de um período prolongado de déficit de precipitação, 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 das mesmas (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 meteorológica, pois depende quase que exclusivamente da água disponível na zona radicular das culturas no solo.

O fechamento dos estômatos das plantas, causado por uma deficiência hídrica, além de tornar o processo fotossintético limitado, relaciona diretamente o desenvolvimento vegetal às condições hídricas do solo em questão. Tal premissa dá suporte a Palmer (1968) quando diz que, de forma simplista, uma seca agrícola nada mais é que um déficit de evapotranspiração. Tal anomalia é calculada por meio da subtração entre valores estimados da evapotranspiração real para uma determinada semana e a ETR média para o período em

questão, ou seja, o valor da Evapotranspiração real climatologicamente esperado . O estudo da seca agrícola exige ainda uma escala de tempo “pequena” (menor do que um mês) para que seu efeito seja corretamente avaliado (PALMER, 1968 e HAYES et al, 1999).

A relação entre os diferentes tipos de seca é complexa. Por exemplo, vazão da água é a variável chave para a análise da seca em atividades relacionadas ao uso da água, como a geração de hidroeletricidade ou irrigação (HEIM JUNIOR, 2002).

Conseqüentemente, ainda segundo Heim Junior (2002, as definições de seca atualmente mais aceitas pelas comunidades meteorológicas internacionais são: um déficit prolongado de precipitação, um déficit de precipitação que resulta em uma baixa disponibilidade hídrica para a atividade que a requer, ou ainda um período anormal seco, suficientemente longo para que a falta de precipitação cause um desequilíbrio hidrológico (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1992 e AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 1997).

Wilhite et al., (1987) destacam que, 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. Baseados nessa premissa, Mckee et al (1993) afirmam ser o tempo requerido, de ocorrência de tal deficiência, que separa os diferentes conceitos desse fenômeno climático.

Devido à complexidade desse fenômeno natural, nenhum índice em particular, tem sido capaz de representar de forma perfeita a intensidade, a severidade e os impactos da seca nos diferentes segmentos da atividade humana (HEIM JUNIOR, 2002). 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 a base de qualquer índice. A World Meteorological Organization (1992) define índice de seca como uma ferramenta relacionada a alguns efeitos acumulativos de um período seco prolongado e anormal.

Heim Junior (2002), citando Fried, identifica cinco critérios básicos que qualquer índice de seca deve apresentar para ser usado no monitoramento das condições hídricas de uma área em questão, que são:

- i) A escala de tempo de análise deve ser apropriada ao estudo,
- ii) O índice deve ser uma medida quantitativa de condições de seca de longa duração,
- iii) O índice deve ser aplicável ao estudo em questão,
- iv) Uma série histórica longa e precisa de valores do índice deve estar disponível para análise e,
- v) Deve ser capaz de ser calculado próximo ao “tempo real”.

2.2 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

Na literatura várias ferramentas de quantificação hídrica, como por exemplo, o estudo da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros do Balanço Hídrico, são apresentadas. Porém, neste trabalho, é adotado o conceito de seca como uma anomalia

climática. Nesse sentido, tais parâmetros, como por exemplo a indicação de deficiência hídrica ou alteração (Alt) negativa do armazenamento de água no solo (Arm) não representam, necessariamente, uma anomalia climática para o Estado de São Paulo, já que na sua maior parte um inverno relativamente seco é climatologicamente esperado. Essa mesma idéia é adotada tanto pelo PDSI como pelo SPI, já que ambos quantificam as condições hídricas de uma área, em relação a uma condição hídrica esperada em uma determinada região.

2.2.1 Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

Palmer (1965) considera que o total de precipitação pluvial requerido para manter uma área sob condições de economia estável é dependente da média dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses precedentes e do atual para a área em questão em um determinado período.

O PDSI tem como base de sua metodologia parâmetros do Balanço Hídrico climático de Thorntwaite & Mather (1955). Karl (1986) apontou o uso desses parâmetros no cálculo dos chamados elementos “Climatologicamente Apropriados às Condições Existentes” (CAFEC), os quais são apresentados em negrito.

$$\mathbf{ET}_i = \alpha * ETP_i \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_i = \beta * PR_i \text{ (mm)} \quad (2)$$

$$\mathbf{RO}_i = \gamma * PRO_i \text{ (mm)} \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_i = \delta * PL_i \text{ (mm)} \quad (4)$$

Sendo:

ET_i - Evapotranspiração Potencial Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).

RO_i - Recarga Potencial Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).

L_i - Perda de Água Potencial Climatologicamente Apropriados Para as Condições Existentes (mm).

ETP - Evapotranspiração potencial (mm)

PR - Recarga potencial (mm).

PRO- Escoamento superficial (Runnoff) (mm).

PL - Perda potencial de água do solo (mm).

i - i-ésimo mês.

Os parâmetros α ; β ; γ ; δ para cada mês do ano em cada região são definidos por:

$$\alpha = ETR/ETP \quad (5)$$

$$\beta = R/PR \quad (6)$$

$$\gamma = RO/PRO \quad (7)$$

$$\delta = L/PL \quad (8)$$

Sendo:

ETR - Média mensal da evapotranspiração real (mm)

ETP - Média mensal da evapotranspiração potencial (mm).

R – Média mensal da recarga de água do solo (mm).

PR – Média mensal da recarga potencial (mm).

RO – Média mensal do runoff (mm).

PRO – Média mensal do runoff potencial (mm).

L – Média mensal da perda de água do solo (mm).

PL – Média mensal da perda de água potencial do solo (mm).

Para o cálculo dos elementos acima citados, Palmer (1965) dividiu o solo em duas camadas, uma superficial (S_s) e outra sub-superficial (S_u). Assim, apenas quando toda água da camada S_s for perdida (perda denominada L_s), é que a camada S_u começará a perder água (L_u). Esses parâmetros foram definidos por Palmer (1965) da seguinte forma:

$$S_{s_i} = 0,25 * Arm_{i-1} \text{ (mm)} \quad (9)$$

$$S_{u_i} = 0,75 * Arm_{i-1} \text{ (mm)} \quad (10)$$

$$S_i = S_{s_i} + S_{u_i} \text{ (mm)} \quad (11)$$

$$L_{s_i} = S_{s_i} \text{ ou } L_{s_i} = |P_i - ETP_i| \text{ qual for menor (mm)} \quad (12)$$

$$L_{u_i} = (ETP_i - P_i - L_{s_i}) * S_{u_i} / CAD_i \text{ (mm)} \quad (13)$$

$$L_i = L_{s_i} + L_{u_i} \text{ (mm)} \quad (14)$$

A recarga de água no solo assume o valor do parâmetro alteração do armazenamento hídrico quando este for positivo, assumindo valor zero para os demais valores de ΔS .

O escoamento superficial, segundo a metodologia de Palmer (1965), só ocorre quando a capacidade de retenção hídrica do solo atinge seu ponto máximo (recarga potencial igual a zero), assumindo, portanto, o valor do excedente hídrico do método do Balanço Hídrico. Nenhum intervalo de tempo é incorporado no modelo para se considerar o atraso entre a ocorrência do excedente hídrico e seu aparecimento como runoff. Tais fatos podem levar a um erro na estimativa desse parâmetro (ALLEY, 1984; KARL, 1986; e HAYES et al, 1999).

Os valores chamados valores potenciais são calculados da seguinte forma:

$$PR_i = CAD_i - Arm_{i-1} \text{ (mm)} \quad (15)$$

$$PRO_i = S_i \text{ (mm)} \quad (16)$$

$$Pls_i = ETP_i \text{ ou } Pls_i = Ss_i \text{ (qual apresentar o menor valor) (mm)} \quad (17)$$

$$Plu_i = (ETP_i - Pls_i) * Su_i / CAD_i \text{ (mm)} \quad (18)$$

$$PL_i = PLs_i + Plu_i \text{ (mm)} \quad (19)$$

Assim a precipitação “Climatologicamente Apropriados às Condições Existentes”

(**P**) pode ser calculada por:

$$P_i = ET_i + R_i + R0_i + L_i \text{ (mm)} \quad (20)$$

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

$$d = P_i - P_i \text{ (mm)} \quad (21)$$

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). O primeiro fator de padronização desenvolvido por Palmer (1965) foi designado pela letra k sendo baseado em dados pertencentes às regiões de Central de Iowa e ocidental de Kansas nos Estados Unidos da América. Sua expressão é:

$$k = (ETP + R)/(P + L) \quad (22)$$

Ao reavaliar a equação 22, Palmer (1965) desenvolve um novo fator de caracterização climática designado pela letra K , sendo baseado em dados climáticos de nove localidades dos EUA, sendo K dado pela equação 23.

$$K = 17,67 * K' / \sum_{i=1}^{12} DK' \quad (23)$$

Sendo:

$$K' = 1,5 \log_{10} |(T + 2,8)/D| + 0,5 \quad (24)$$

$$T = (ETP + R + RO)/(P + L) \quad (25)$$

D - média mensal dos valores absolutos de d .

Assim como o fator k , T é também uma relação entre a demanda e o suprimento hídrico de uma área, entretanto, esse último considera R_0 , como componente da demanda por água em uma região.

Segundo Palmer (1965), o produto entre o fator K de caracterização climática e d resulta em um índice Z de anomalia hídrica (equação 26), padronizado temporalmente e espacialmente.

$$Z = d * K \tag{26}$$

Entretanto, a utilização de apenas nove localidades para a estimativa do fator K é criticada por Alley (1984), por não produzir confiabilidade que permitisse, em nível nacional, a comparação de condições hídricas de diferentes regiões. Segundo Wells et al., (2004), uma crítica comum ao PDSI é o fato desse apresentar um comportamento inconsistente em diferentes localidades, dificultando ou até mesmo impossibilitando as comparações espaciais de valores do índice de Palmer.

O valor de 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, sendo mais indicado aos interesses agrícolas do que o próprio Índice de Palmer (KARL, 1986). Valores negativos do índice Z denotam períodos secos, enquanto valores positivos períodos úmidos.

Calculado Z (com base no fator k em vez do fator K) para as localidades de Central Iowa e Western Kansas, Palmer (1965) escolheu os treze períodos mais secos dessas séries históricas 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:

$$X_i = (Z_i/3) + 0,897 * X_{i-1} \quad (27)$$

Sendo:

X_i - valor do índice de Palmer do mês questão;

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

No desenvolvimento da equação 27, Palmer (1965) adotou o valor de menos quatro, como sendo o representante de seca extrema. Alley (1984) critica a arbitrariedade desse autor ao escolher treze períodos secos e o valor de menos quatro como representativo de seca extrema.

A análise da equação 27 demonstra a grande influência de meses precedentes no valor atual da PDSI (X_i), resultando em uma memória exagerada inerente a este índice (ALLEY, 1984 e GUTTMAN, 1998). Em outras palavras, o Índice de Palmer apresenta respostas lentas a mudanças no regime de precipitação.

Segundo Karl (1986), a equação 27 é, devido a sua grande memória, apropriada a um índice de seca hidrológica. Entretanto, o objetivo de Palmer (1965) era desenvolver uma

ferramenta meteorológica, considerando, portanto, que quando as condições climáticas de uma região tornam-se normais ou úmidas, o fim de uma seca está estabelecido (níveis dos reservatórios ou umidade do solo não são considerados) (KARL, 1986).

A fim de caracterizar apenas as condições climáticas, Palmer, (1965) dividiu a equação 27 em três categorias (X1, X2 e X3) que indicam:

X1 Período úmido que está se estabilizando (valores de equação 27 entre 0 e 1);

X2 Período seco que está se estabilizando (valores de equação 27 entre 0 e -1);

X3 Período seco ou úmido estabilizado.(valores de equação 27 maiores que 1 ou menores que -1).

Assim, quando um período estabelecido é considerado terminado, X3 assume o valor zero e X1 ou X2 (dependendo das condições hídricas vigentes) assumem no primeiro mês do novo período, o valor de um terço do índice Z e nos meses subseqüentes o valor da equação 27 até que um novo período estabelecido seja detectado (PALMER, 1965 e ALLEY, 1984). 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 sendo uma das três categorias acima citadas, o que segundo Alley, (1984) nem sempre é uma escolha óbvia e requer, em alguns casos, a espera de meses subseqüentes para tal, pois não é raro em períodos não estabelecidos, X1 e X2 serem indicados simultaneamente, dificultando o uso do índice para o monitoramento em tempo real.

A fim de estabelecer o final de uma seca meteorológica Palmer (1965) desenvolveu a equação 28, a qual expressa a umidade recebida por uma área como porcentagem da umidade requerida para definitivamente terminar um período estabilizado nessa mesma região.

$$Pe = \frac{\sum_{j=0}^{j=j^*} U_{i-j}}{Ze + \sum_{j=1}^{j=j^*} U_{i-j}} * 100\% \quad (28)$$

Sendo:

$$Ze(i) = -2,691X3_{(i-1)} - 1,5 \text{ (No caso de seca estabelecida)} \quad (29)$$

$$U = Z + 0,15 \text{ (No caso de seca estabelecida)} \quad (30)$$

ou

$$Ze(i) = -2,691X3_{(i-1)} - 1,5 \text{ (No caso de período úmido estabelecido)} \quad (31)$$

$$U = Z - 0,15 \text{ (No caso de período úmido estabelecido)} \quad (32)$$

Ze , representa o valor necessário de Z para que, em um único mês o PDSI atinja o valor de $-0,5$ no caso de uma seca ou de $+0,5$ no caso de um período úmido estabelecido, j indica o número de meses em que está sendo registrado um período estabelecido e j^* representa o último mês em que a equação 28 deve ser calculada.

Karl (1986) descreve um exemplo do uso da equação 28 em que cinco meses consecutivos, assumem o valor de 0%, 5%, 25%, 75% e 100%, respectivamente. De acordo com metodologia descrita por Palmer (1965) o segundo mês da série ($Pe=5\%$) é considerado

como o período final de uma seca. Entretanto, tal fim só pôde ser estabelecido quando P_e atingiu a magnitude de 100% (quinto mês da série). A espera de meses subsequentes para se estabelecer o fim de um evento seco nunca permitirá o uso satisfatório do PDSI para o monitoramento em tempo real de uma região (KARL,1986).

Segundo Alley (1984) há uma inconsistência no uso da equação 28 para a indicação de um período estabelecido, pois em determinados casos, P_e pode atingir o valor de 100% (por exemplo fim de uma seca estabelecida), mas $Z(i)$ ainda ser menor do que $Z_e(i)$.

O PDSI indica duas das mais importantes propriedades de uma seca, seu início e seu fim, usando, entretanto, regras arbitrárias para tal (ALLEY,1984).

Palmer (1965) considerou 11 categorias de classificação de eventos, como é demonstrado na Tabela 1:

Tabela 1 - Categorias do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI).

PDSI	CATEGORIA
$\geq 4,00$	Extremamente Úmido
3,00 a 3,99	Muito Úmido
2,00 a 2,99	Moderadamente Úmido
1,00 a 1,99	Ligeiramente Úmido
0,50 a 0,99	Úmido Incipiente
0,49 a -0,49	Próximo ao Normal
-0,50 a -0,99	Seca Incipiente
-1,00 a -1,99	Ligeiramente Seco
-2,00 a -2,99	Moderadamente Seco
-3,00 a -3,99	Muito Seco
$\leq - 4,00$	Extremamente Seco

Tradicionalmente, os coeficientes usados no cálculo do PDSI são baseados em períodos anômalos secos de determinadas series históricas. Entretanto, a adoção de diferentes séries históricas pode causar grandes alterações na magnitude do Índice de Palmer, para uma mesma região. Tais variações são maiores do que aquelas que ocorreriam se a evapotranspiração potencial de um mês fosse forçada a uma constante igual à média mensal daquela região. Tal característica mostra-se bem menos significativa nas variações apresentadas pelo índice Z de anomalia hídrica (KARL, 1986).

Karl e Koscielny (1982) notaram que o PDSI aponta secas com intervalos de tempo mais longos no interior dos Estados Unidos do que nas áreas litorâneas desse país. Testes de sensibilidade demonstram que tal característica não está diretamente relacionada à variação espacial da capacidade de armazenamento do solo usada no cálculo do Índice de Palmer nas diferentes regiões, mas sim às características climáticas de cada região.

Conclusão semelhante foi apontada por Karl (1983) ao afirmar que a menor duração dos períodos de seca (detectados pelo PDSI) nas regiões das Montanhas Rochosas e das Altas Planícies em relação as demais áreas dos EUA parecem ser reais, e não conseqüentes de falhas na metodologia de Palmer (1965).

Hayes et al (1999), ao usarem o PDSI como ferramenta no monitoramento das condições hídricas dos Estados Unidos da América do Norte, notaram uma grande freqüência de ocorrência das categorias de seca severa e extrema em pontos esparsos dos EUA. Entretanto, segundo esses autores, para um índice padronizado e útil para decisões nacionais de combate a seca, tais categorias deveriam ser observadas concomitantemente e raramente.

Segundo Alley (1984) e Heddinghaus e Sabal (1991), a distribuição do Índice de Palmer em uma série histórica longa é bi-modal, o que limita a capacidade do índice em estimar probabilidade de ocorrência de períodos anômalos. Eder e Davis (1987) ao utilizarem o PDSI na parte sudoeste dos Estados Unidos da América do Norte, afirmam que essa indesejável distribuição (bi-modal) é resultado de falhas na metodologia do PDSI e não é refletida nas condições físicas, úmidas ou secas, da região em questão.

Entretanto, Rao e Padmanabhan (1984), afirmam que modelos de previsão do PDSI em base mensal podem ser desenvolvidos com razoável precisão, e Sansigolo (2004) afirma que a excepcional memória do PDSI pode ser usada para fins de previsão.

Ao comparar o PDSI ao SPI, Guttman (1998) ressalta que apenas um único valor do índice de Palmer é o responsável pela adoção ou suspensão de planos de contingência de seca, independente da atividade em questão (sem distinguir os vários tipos de seca), enquanto o SPI foi desenvolvido para ser um indicador que reconhece a importância das escalas de tempo na análise da disponibilidade de água para cada atividade em particular.

2.2.2 Índice Padronizado de Precipitação (Standardized Precipitation Index, SPI).

Desenvolvido por McKee et al., (1993 e 1995) o Índice Padronizado de Precipitação quantifica o déficit ou o excesso de precipitação em diferentes escalas de tempo. Essa característica torna o SPI uma valiosa ferramenta para todos os estudos de disponibilidade hídrica, sejam eles de curta ou longa duração (HAYES et al., 1999).

Quando a escala de tempo utilizada (1, 2 ou 3 meses, por exemplo) é pequena, o SPI move-se freqüentemente acima ou abaixo de zero. Conforme aumenta o período de análise (12 ou 24 meses, por exemplo) o SPI responde mais lentamente a mudanças na precipitação. Períodos com índices negativos tornam-se menores em número, porém, mais longos em duração (MCKEE et al., 1999).

O primeiro passo para o cálculo do SPI é a determinação da probabilidade de distribuição de freqüência de precipitação pluvial, a qual é calculada por meio da distribuição gama incompleta. A função normal inversa (Gaussiana) é aplicada a essa probabilidade. Sendo o resultado o SPI. A distribuição gama é definida por:

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} * e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{para } x > 0 \quad (33)$$

Sendo:

$\alpha > 0$ - parâmetro de forma da distribuição gama

$\beta > 0$ - parâmetro de escala da distribuição gama

$\Gamma(\alpha)$ a função gama.

Os parâmetros α e β são calculados pelo método da máxima verossimilhança, como demonstrados por Thom (1966).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + 4A/3} \right) \dots \beta = \bar{P} / \alpha \quad (34)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \sum (\ln(P)) / n \quad (35)$$

Sendo:

P - total de precipitação no tempo de análise.

Como a função gama é indefinida para $x = 0$ e a distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa torna-se:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (36)$$

$$q = (m/n) \quad (37)$$

Sendo:

q -probabilidade de ocorrência de precipitação zero,

m -número de observações com chuva igual a zero

n -número de observações com chuva maior do que zero

$H(x)$ é então transformada em uma variável normal (valor final do SPI) por meio das equações desenvolvidas por Abramowitz e Stegun, (1965).

$$\begin{aligned}
 SPI &= -\left(a - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0,5 \\
 SPI &= +\left(a - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ para } 0,5 < H(x) < 0,5
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Sendo:

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} && \text{para } 0 < H(x) \leq 0,5 \\
 a &= \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} && \text{para } 0,5 < H(x) < 1
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

sendo:

$$c_0 = 2,515517; c_1 = 0,802853; c_2 = 0,010328; d_1 = 1,432788; d_2 = 0,189269; d_3 = 0,001308$$

No caso da precipitação pluviométrica de um determinado período se ajustar à distribuição normal o SPI será simplesmente a variável reduzida Z_i de tal distribuição.

$$SPI = Z_i = (P_i - P_i) / \sigma_1 \tag{40}$$

Sendo:

P_i - Precipitação acumulada no período

P_i - Precipitação média do período em questão.

σ_1 - Desvio padrão da série histórica de precipitação na escala em estudo.

Segundo Hayes et al., (1999) por se ajustarem à distribuição normal, pode-se esperar, em uma longa série histórica, que 68% dos valores do SPI estejam entre 1 e -1, 95% dos valores estejam entre 2 e -2 e 99% dos valores estejam entre 3 e -3. Uma interpretação relacionada é que magnitudes do SPI menores que menos um ocorram dezesseis vezes em cem anos, magnitudes do SPI menores que menos dois ocorram de duas a três vezes em cem anos e valores menores que menos três ocorram uma vez a cada duzentos anos.

O evento seca começa quando o SPI torna-se negativo e atinge o valor de -1 e termina quando este volta a apresentar valores positivos. Dentro de sua escala, magnitudes menores ou iguais a -2 indicam seca extrema, e maiores ou iguais a 2, umidade extrema, como pode ser visualizado na Tabela 2

Tabela 2 – Valores do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) e Categorias de seca ou de umidade.

SPI	Categoria
$\geq 2,00$	Extremamente Úmido
1,5 a 1,99	Severamente Úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente Úmido
0,1 a 0,99	Umidade Incipiente
0 a -0,99	Seca Incipiente
-1,00 a -1,49	Moderadamente Seco
-1,50 a -1,99	Severamente Seco
$\leq - 2,00$	Extremamente Seco

Cada valor de SPI corresponde a um único valor de chuva para um determinado período de uma determinada escala de tempo (MCKEE et al, 1993 e HAYES et al, 1999).

Mckee et al., (1995) ao correlacionarem o PDSI ao SPI demonstram que o Índice de Palmer possui uma escala de tempo inerente ao local de estudo (10 a 14 meses, geralmente). Esses autores afirmam ainda ser o PDSI voltado aos interesses agrícolas. Tal afirmação não coincide com Karl (1986), quando este demonstra que o Índice de Palmer é uma ferramenta meteorológica (como citado anteriormente). O próprio Palmer (1965) afirma ser seu estudo voltado à análise climatológica de uma região não podendo ser aplicado a atividades agrícolas sem que essa limitação seja observada.

Guttman (1999) afirma que o SPI, para ser um indicador de seca padronizado no espaço e no tempo, adotou uma distribuição de frequência (distribuição gama incompleta) padrão para seu cálculo. Apesar de Guttman (1998), afirmar que tal distribuição é apropriada para descrever uma longa série histórica de precipitação, Guttman (1999) diz ser a distribuição de Pearson tipo III o melhor modelo universal para a estimativa de probabilidade de ocorrência de valores precipitação pluvial.

Hayes et al (1999) fazem ainda as seguintes considerações sobre o SPI:

- 1) Devido às características da distribuição normal, as categorias de seca extrema e severa, detectadas pelo SPI, ocorrem com a mesma frequência para todas as localidades do país em questão em um longo período de análise. Portanto, o SPI, não consegue identificar regiões mais susceptíveis à seca.

- 2) Antes de ser aplicado a uma situação específica, um conhecimento prévio da climatologia da região é necessária, pois em pequenas escalas de tempo, (1, 2 ou 3 meses), o

SPI é muito similar à percentagem da representação normal de precipitação, a qual pode ser enganosa em regiões onde baixos totais de precipitação sazonais são climatologicamente esperados.

3) Apesar de ter sido desenvolvido para o Estado de Colorado, EUA, o SPI pode ser aplicado a qualquer local que possua uma série histórica de precipitação com pelo menos trinta anos de dados mensais.

Santos e dos Anjos (2001) ao utilizarem o SPI como ferramenta para o monitoramento das condições hídricas do Estado de Pernambuco, concluíram que a utilização desse índice, além de caracterizar e indicar com certa antecedência situações de seca, também é capaz de indicar situações climáticas extremas entre diferentes microrregiões.

Autores como Mckee et al (1993, 1995), Gutman (1998,1999), Hayes et al (1999) e Keyantash e Dracup (2004) indicam que o SPI é uma ferramenta que irá otimizar o “tempo de identificação” de condições emergentes de uma seca, devendo por esse fato substituir naturalmente o PDSI como ferramenta de monitoramento.

2.3 Estudos no Estado de São Paulo

O primeiro estudo em que se utilizou o PDSI no Estado de São Paulo foi feito por Moraes e Santos (1986) ao aplicarem tal índice na localidade de Piracicaba entre os anos de

1917 a 1970. Entretanto, Santos et al (1987) afirmam que a metodologia original de Palmer (1965) só é válida para a região na qual foi originalmente desenvolvida.

Santos e Pereira (1999) fizeram uma tentativa de adaptar a metodologia proposta por Palmer (1965) às condições ambientais do oeste do Estado de São Paulo para identificar e classificar períodos de seca dessa região. A adaptação foi feita a partir dos períodos mais secos da região em questão. Foram identificados intervalos iguais ou maiores que quatro meses contínuos que apresentavam índices Z negativos; efetuando-se a regressão linear entre a média da soma acumulada desses índices Z negativos, para esses intervalos, e seus respectivos números de meses de duração. Chegou-se então à equação final de quantificação de seca (PDSI).

$$PDSI_i = Z_i/5,737 + 0,56 * PDSI_{i-1} \quad (41)$$

Os resultados obtidos foram considerados coerentes quando comparados ao parâmetro de deficiência hídrica do Balanço Hídrico de Thornthwaite & Mather (1955). Santos e Pereira (1999) ressaltam ainda que a frequência de meses com déficit hídrico é maior do que a quantidade de meses com PDSI menor ou igual à -1. Isso se deve ao fato do método de Palmer considerar um mês seco como aquele que apresenta chuva menor do que a climatologicamente esperada.

As secas severas ou extremas concentraram-se em janeiro e fevereiro, no auge da estação chuvosa da região, sendo a de maior intensidade registrada em Araçatuba-SP, com magnitude do índice de -28,26. Este valor é um indicativo de que a adaptação do Índice de

Severidade de Seca de Palmer, proposta por Santos e Pereira (1999), tende a superestimar os valores do PDSI original, sempre que a precipitação observada é razoavelmente menor do que a climatologicamente esperada. Segundo os próprios autores este fato pode ser resultado de algumas simplificações feitas no índice original, como por exemplo a não adoção de uma equação de ponderação do fator K (SANTOS e PEREIRA, 1999).

Brunini et al., (2001) comparando valores do SPI aos parâmetros do método do Balanço Hídrico, concluiu que o SPI permite um adequado monitoramento e quantificação da seca, proporcionando a indicação de soluções para minimizar seus efeitos negativos, tanto sociais quanto físicos. A possibilidade de utilização desse índice em base decencial permitirá um melhor monitoramento e avaliação do impacto ocasionado pelos efeitos da seca (BRUNINI et al., 2001).

Brunini et al. (2002a) avaliaram o Índice de Palmer para a quantificação da seca agrícola no Estado de São Paulo, tanto em base mensal como em base decencial. O estudo foi baseado nas 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 decencial 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 responder às alterações do Sistema Solo-Planta-Atmosfera.

No caso de anos excessivamente úmidos (1982/1983), os valores mensais e decenciais apresentam o mesmo início, porém, com magnitudes diferentes, o que também

pode estar relacionado aos períodos de resposta na alteração do armazenamento de água no solo (BRUNINI et al 2002a).

Um exemplo da versatilidade do monitoramento utilizando SPI foi feito por BRUNINI et al (2002b). Os autores relatam que em março de 2001, de acordo com o SPI mensal, quase toda área do Estado de São Paulo encontrava-se com totais de chuva próximos ou inferiores à normal, já o SPI bi-anual indicava condições de seca.

Sansigolo (2004) comparou séries históricas do PDSI e do SPI na região de Piracicaba nos anos de 1917 a 2001, usando análise espectral. Esse autor conclui que esses dois índices são linearmente relacionados (apesar de uma defasagem sistemática) e que a precipitação é o elemento dominante nos valores do PDSI.

Essa última afirmação parece concordar com Karl (1986) quando este demonstra que o PDSI ao ser calculado com evapotranspiração potencial igual a média mensal da região em questão (em vez da realmente ocorrida), não apresenta uma alteração tão significativa em seus valores, principalmente se comparado a que ocorreria se o período de “calibração” fosse alterado.

Ainda segundo Sansigolo (2004), o PDSI apresentou uma excepcional memória a qual pode ser explorada para fins de previsão. O SPI não apresentou periodicidade significativa.

É interessante ressaltar que todos os trabalhos relacionados ao PDSI no Estado de São Paulo aqui apresentados adotam o valor de 100 mm de capacidade de água disponível (ArmMax) como base para o cálculo do balanço hídrico.

2.4 Distribuição Gama

Segundo Dale et al. (1968) a distribuição gama possui bom ajuste para variáveis contínuas que tenham limite inferior igual a zero e não possuam limite superior, sendo, com isso, largamente utilizada para o estudo de séries históricas de precipitação. Ainda segundo esses autores, as distribuições do tipo “j” são muito comuns em totais mensais de precipitação.

Dale et al., (1968) aplicaram a distribuição gama para a localidade de Piracicaba –SP no período de 1917 a 1941 para o mês de novembro, concluindo que a distribuição gama ajustou-se melhor à distribuição empírica do que à distribuição normal, sendo esse ajuste testado pelo método do qui-quadrado e do Kolmogorov-Smirnov.

Arruda e Pinto (1980) utilizaram um modelo simplificado da distribuição gama para analisar a frequência de distribuição decendial da precipitação na região de Campinas. Ávila (1994) concluiu que o regime mensal de chuva no Rio Grande do Sul adequa-se a distribuição gama utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov em seus estudos.

CUNHA et al. (1997) utilizam o modelo de distribuição gama de probabilidade para estimar os valores de precipitação pluvial nos níveis de 25, 30, 50, 70, 75, e 85% de probabilidade de ocorrência para a região de Baurú no Estado de São Paulo em base mensal.

O modelo demonstra que o valor da média aritmética da chuva para o período em questão, encontra-se entre os valores de 30 a 50% de probabilidade de ocorrência, subestimando os valores encontrados no nível de 75%, patamar este recomendado para a maioria dos projetos agrícolas.

Moraes et al. (2001) consideram que a distribuição gama é indicada para o dimensionamento de sistemas de irrigação suplementar, em Lavras-MG, realçando a boa aderência dos dados de precipitação à distribuição gama incompleta. Para chegar a esta conclusão os autores utilizaram dados diários de chuva da região em questão, agrupados em 6, 12, 18, 24 e 30 dias ajustados à distribuição gama a qual teve a sua aderência verificada pelo teste do qui-quadrado. Os parâmetros da distribuição gama foram estimados pelo método da máxima verossimilhança.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Foram utilizados dados de temperatura média do ar e de precipitação pluviométrica de 11 postos meteorológicos do Estado de São Paulo pertencentes ao Instituto Agrônomo, do posto da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) e dados de precipitação da localidade de Valentim Gentil pertencente ao Departamento de Água e Energia Elétrica (Tabela 3). 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 PDSI adap.

Tabela 3 – Relação dos postos 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
MteAlegre	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

Os balanços hídricos foram gerados por meio de software desenvolvido por Brunini e Caputi (2000) e o SPI gerado por meio de software fornecido pelo National Drought Mitigation Center (NDMC) – Lincoln/Nebraska-EUA.

3.2 Métodos

3.2.1 Balanço Hídrico climatológico

O método do Balanço Hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) é baseado no cotejo de duas curvas, uma referente à marcha de precipitação e a outra à evapotranspiração potencial, a qual corresponde à precipitação ideal na período, de forma a não haver excedente ou deficiência hídrica (CAMARGO,1962).

O estudo aqui realizado é feito em base climática e comparativa, assim pode-se assumir que, apesar de um solo arenoso possuir uma menor capacidade de retenção de água por unidade de volume do que um argiloso, nesse primeiro tipo de solo há um maior aprofundamento do sistema radicular das plantas, resultando em uma capacidade de água disponível semelhante nos dois tipos de solo. Baseado nessa afirmação e no fato desse estudo considerar o desvio (anomalia) que os parâmetros do Balanço Hídrico climático de um determinado período apresentam em relação aos valores climatologicamente esperados dos mesmos, para o intervalo de tempo em questão, adotou-se o limite de 100 mm como capacidade máxima de água disponível (ArmMax) no solo, para todas as localidades do estudo, independente do tipo de solo.

3.2.2 Adaptação do PDSI às condições climáticas do Estado de São Paulo

Segundo a metodologia original de Palmer (1965), as características climáticas de cada região são representadas pelo fator K. Portanto, a adaptação do PDSI às condições do Estado teve como foco principal o ajuste desse fator. Os outros elementos da metodologia original, como os fatores CAFEC e o índice d, foram calculados como descritos no trabalho original.

Palmer (1965) considerou como primeira aproximação do fator de caracterização climática uma relação entre a demanda média e o suprimento médio de água de uma região, sendo denotada pela letra k (equação 22). Tal aproximação foi também inicialmente adotada nesse estudo. Assim, k para cada mês em cada uma das seis localidades base foi calculada com base na equação 22.

Definido tal parâmetro, o índice z de anomalia hídrica para cada mês em cada uma das seis localidades base torna-se:

$$z = d * k \quad (42)$$

Uma análise de regressão linear simples entre índices z acumulados e seus respectivos números de meses de ocorrência, nas seis localidades base desse estudo, foi realizada para os períodos abaixo 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; fev/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:

$$\Sigma Z_i = -2,17t - 1,8 \quad (43)$$

Sendo:

t - número de meses do período considerado e;

$\Sigma_i Z(t)$ - índice Z acumulado no período considerado.

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado, a fim de se verificar se todos os períodos utilizados apresentavam uma condição semelhante de seca entre si, isto é, uma taxa uniforme de variação do índice z independente 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. Porém, uma análise das séries históricas dos eventos de seca ocorridos no Estado de São Paulo, demonstra que o valor (também arbitrário) -3 é mais

adequado como indicativo de seca extrema para o Estado em questão, pois em todas as séries analisadas, houve apenas uma ocorrência do PDSI com valor menor do que -4 (Abril de 1964, Piracicaba). Assim:

$$x_i = \Sigma z(t) / (0,70t + 0,60) \quad (44)$$

Sendo:

x_i - valor do índice de Palmer do mês questão;

$\Sigma z(t)$ - somatório de z no intervalo de tempo t .

Segundo Palmer (1965), em meses sucessivos, uma certa deficiência hídrica será 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 a normal (PALMER, 1965).

Assim, a contribuição de cada mês foi quantificada seguindo a metodologia de Palmer (1965), isto é, faz-se $t = 1$ e $i = 1$ na equação 44:

$$x_1 = z(1) / 1,3 \quad (45)$$

A taxa na qual o índice z deve aumentar para manter um valor constante de x , foi calculado adicionando-se um termo c na equação 45.

$$\Delta x = (z_i/1,3) + c \cdot x_{i-1} \quad (46)$$

A determinação da constante c é feita, com base na equação 44. Nesta expressão, pode-se calcular o valor necessário de z_i para manter um dado valor de x em meses subsequentes ($\Delta x = 0$). A Tabela 4 mostra dois valores arbitrários de $x_{i-1} = x_i$ ocorridos em dois determinados meses t .

Tabela 4 – Valores arbitrários de t, x_i, x_{i-1} e Δx .

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 45 para os seguintes casos de:

a) $x_{i-1} = x_i = -1$, $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$ tem-se:

$$\Sigma Z_1 = -1,3 \text{ e } \Sigma Z_2 = -2,0$$

$$\Delta Z = -0,7$$

b) $x_{i-1} = x_i = -1$, $t_i = 10$ e $t_{i-1} = 9$

$$\Sigma Z_1 = -7,6 \text{ e } \Sigma Z_2 = -6,9$$

$$\Delta Z = -0,7$$

c) $x_{i-1} = x_i = -3$, $t_i = 2$ e $t_{i-1} = 1$

$$\Sigma Z_1 = -3,9 \text{ e } \Sigma Z_2 = -6,0$$

$$\Delta z = -2,1$$

$$d) x_{i-1} = x_i = -3, t_i = 10 \text{ e } t_{i-1} = 9$$

$$\Sigma z_1 = -20,7 \text{ e } \Sigma z_2 = -22,8$$

$$\Delta z = -2,1$$

Sendo:

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 de seca ($x_{i-1} = x_i$) seja mantida.

Os valores de Δz foram então aplicados na equação 46 a fim de se determinar o valor de c , resultando na primeira equação do Índice de Severidade de Seca de Palmer adaptado para São Paulo.

$$x_i = (z_i / 1,3) + 0,46 * x_{i-1} \quad (47)$$

Por meio da equação 47 foram calculados os valores de x para todos os meses de todas as seis localidades base desse estudo.

Por meio da equação 24, Palmer (1965) faz uma primeira reavaliação do índice k de caracterização climática, denominado agora pelo símbolo K' , ou seja:

$$k = (ETP + R)/(P + L) \quad (22)$$

Assume a forma de K':

$$K' = 1,5 \log_{10} |(T + 2,8)/D| + 0,5 \quad (24)$$

No presente trabalho, valores de K' foram gerados para as 6 localidades base. A equação 42 foi recalculada substituindo-se os valores de k por K' resultando em novos valores do índice de anomalia, denominados de Z' (Z' = d * K') os quais, por sua vez, foram aplicados à equação 48 resultando em novos valores do índice final, denominados de X', para todos os meses de todas as localidades base desse estudo.

Palmer (1965), ainda faz um ajuste final nos valores mensais de K', baseado na média da soma anual do produto DK' de 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) resultando em um DK' médio de 17,67. A mesma metodologia foi usada para as seis localidades base do Estado de São Paulo resultando em um produto DK' médio igual a 22,80, logo a expressão final de K para o Estado de São Paulo torna-se:

$$K = (22,8K')/\Sigma DK' \quad (48)$$

O desvio padrão e o coeficiente de variação foram calculados para o produto DK' médio de 22,80 baseando-se inicialmente nas seis localidades que o geraram e sendo posteriormente extrapolado para as 12 primeiras localidades da Tabela 3.

Do mesmo modo que K' , valores de K foram gerados para as 6 localidades em questão, sendo então a equação 42 recalculada substituindo-se os valores de k por K resultando em novos valores do índice de anomalia (denominados de Z) os quais, por sua vez, foram aplicados à equação 48 resultando em novos valores do índice final (denominados de X) para todos os meses de todas as 6 localidades base desse estudo.

É importante ressaltar que a equação 47 foi desenvolvida a partir de resultados gerados pela equação 42 para os períodos acima destacados. Essa última utiliza um fator k , o qual foi posteriormente reavaliado assumindo a forma de K . Apesar de não constar da metodologia original, julgou-se importante refazer os cálculos que geraram a equação 42, utilizando o fator K reavaliado, em vez de k , no cálculo dos novos índices de anomalia hídrica, denominados de Z , (regressão linear simples entre Z acumulados e seus respectivos números de meses de ocorrência para os períodos acima destacados) resultando com isso em uma nova equação final do índice (equação 49). O coeficiente de determinação (R^2) foi novamente calculado a fim de verificar se os períodos utilizados apresentavam novamente uma condição semelhante entre si de seca.

$$PDSI\ adap_i = (Z_i/0,94) + 0,15 * PDSI\ adap_{i-1} \quad (49)$$

Por meio da equação 49 foram calculados os novos valores do índice final de severidade de seca, denominado de $PDSI\ adap$, para todos os meses de todas as 12 primeiras localidades da Tabela 3.

3.2.3 Avaliação das adaptações do PDSI

O fenômeno seca é entendido, nesse estudo, como uma anomalia climática. Com isso, pode-se assumir que o evento seca ocorre quando as condições hídricas do mês em questão encontram-se abaixo das climatologicamente esperadas. Em outras palavras, se o mês em questão, por exemplo julho de 2003, apresentar uma condição hídrica mais seca do que a média de todos os Julhos de uma longa série histórica, haverá então um indicativo do evento seca.

Após o cálculo do Balanço Hídrico seqüencial mensal, das 12 primeiras localidades da tabela 3, foi gerada, em cada local, uma coluna adicional denominada Exc – Def, para todas as séries históricas, a qual é a diferença entre o excedente e a deficiência hídrica de cada mês. A média mensal dessa nova coluna foi calculada, sendo denominada de (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 a uma terceira coluna denominada Anomalia Hídrica (AH), como pode ser visualizado na Tabela 5, nos anos de 1963/64, para a localidade de Campinas.

Quando AH é menor que zero, as condições hídricas de um período encontram-se abaixo da esperada, sendo um indicativo do fenômeno seca. Desta maneira, foram realizadas análises de regressão linear simples entre valores de AH de cada mês e os respectivos valores do Índice de Severidade de Seca de Palmer, tanto o original quanto os gerados pelas 4 diferentes adaptações (x, X', X e PDSI adap), para toda a série histórica das 12 primeiras localidades da Tabela 3.

Tabela 5 – Cálculo de AH para a localidade de Campinas no período de 1963/64.

Data	Exc - Def	(Exc – Def) Médio	AH
01/01/63	281,9	118,2	163,7
01/02/63	135,1	92,7	42,4
01/03/63	-11,0	46,8	-57,8
01/04/63	-28,0	2,3	-30,3
01/05/63	-43,5	9,5	-53,0
01/06/63	-40,1	1,5	-41,6
01/07/63	-51,3	-10,6	-40,7
01/08/63	-57,8	-22,1	-35,7
01/09/63	-88,3	-15,9	-72,4
01/10/63	0,0	-1,3	1,3
01/11/63	58,6	12,8	45,8
01/12/63	-18,7	80,5	-99,2
01/01/64	-3,8	118,2	122,0
01/02/64	187,3	62,7	94,7
01/03/64	-18,0	46,8	-64,8
01/04/64	-35,7	2,3	-38,0
01/05/64	0,0	9,5	-9,5
01/06/64	-4,6	1,5	-6,1
01/07/64	0,0	-10,6	10,6
01/08/64	-26,10	-22,1	-4,1
01/09/64	-8,5	-15,9	-7,4
01/10/64	23,1	-1,3	24,4
01/11/64	-7,7	12,8	-20,5
01/12/64	238,1	80,5	157,6

Ao contrário do que propõe o PDSI, os valores de AH não são padronizados espacialmente e temporalmente. Em outras palavras, uma mesma magnitude de AH pode indicar condições hídricas diferentes quando ocorre em meses diferentes. Com isso, valores do PDSI adap, do PDSI e valores de AH foram agrupados em meses iguais a fim de calcular os coeficientes de determinação (R^2), gerados pela análise de regressão linear entre o PDSI adap e AH e entre o PDSI e AH, para os meses de Janeiro, Março, Julho e Outubro, nas 12 primeiras localidades da Tabela 3.

3.2.4 Determinação do início e do fim de uma seca de acordo com o PDSI adap

Um dos grandes objetivos de se quantificar a seca em base temporal e espacial é detectar seu início para que medidas de combate sejam aplicadas o mais rápido possível. Palmer (1965) considera, de forma arbitrária, que uma seca tem seu início quando a magnitude de seu índice torna-se inferior a -1 e estabelece, ainda, uma metodologia para indicar seu fim, que segundo Alley (1984) e Karl (1986) dificulta o uso do PDSI para o monitoramento, próximo ao tempo real, das condições hídricas de uma área.

A fim de tornar o PDSI uma ferramenta facilmente usada no monitoramento próximo ao tempo real, os valores de -1 (da metodologia original) 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 tornar-se inferior a esse limite, uma seca está detectada e quando o índice retornar ou ultrapassar esse patamar essa anomalia climática chegou ao fim.

A coerência desses limites (-1 ou $-0,5$) foi avaliada por meio da equação 49, fazendo-se $\text{PDSI adap}_i = -1$ e $\text{PDSI adap}_i = -0,5$:

Para $\text{PDSI adap}_i = -1$ tem-se:

$$Z_{\text{esp}} = Z_i = -0,14 * \text{PDSI adap}_{i-1} - 0,94 \quad (50)$$

Para $\text{PDSI adap}_i = -0,5$ tem-se:

$$Z_{\text{esp}} = Z_i = -0,14 * \text{PDSI adap}_{i-1} - 0,47 \quad (51)$$

Sendo:

$$Z_{\text{esp}} = d_{\text{esp}} * K \quad (52)$$

É interessante ressaltar que, uma vez detectada uma seca, Z_{esp} é o valor que o índice Z de anomalia hídrica deveria apresentar nos meses subsequentes a esta 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 alcançar para que tal fato ocorresse.

Assim, pôde-se estimar qual valor de precipitação deveria ter ocorrido (P_{esp}) para que o índice não indicasse condições de seca tanto para o limite de -1 quanto para o de -0,5:

$$P_{esp} = (Z_{esp}/K) + P \quad (53)$$

Portanto, se o valor de PDSI adap escolhido como limite for coerente com as condições hídricas média de uma região, a P_{esp} resultante pode ser considerada como o valor de precipitação que traz as condições hídricas de um local ao patamar climatologicamente esperado.

A afirmação acima foi avaliada nos anos de 1961, 1963, e 2003, para as localidades de Campinas, Jaú, Mococa, Piracicaba, Ribeirão Preto e Tatuí comparando-se à relação ETR/ETP, a qual seria obtida em um balanço hídrico seqüencial mensal se a precipitação ocorrida fosse igual a P_{esp} , com a média mensal da relação ETR/ETP para os anos de 1961 a 1990. Tal comparação foi realizada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do índice de concordância de Willmott.

Desenvolvido por Willmott et al., (1985) o índice de concordância quantifica numericamente a exatidão entre valores estimados e observados de um determinado parâmetro. Variando entre 0 (não há concordância entre parâmetros estimados e observados) e 1 (concordância total) essa ferramenta indica o quanto a linha de tendência de uma regressão linear difere da linha 1:1, ou seja, o quanto a inclinação desta difere de 1 e o quanto o intercepto desta difere de 0.

É interessante ressaltar que o coeficiente de determinação (R^2) indica o grau de dispersão que um conjunto de dados, gerados por dois parâmetros sob estudo, apresenta em relação à linha de tendência média destes. Em outras palavras, indica o erro aleatório. Já o índice de Willmott indica um possível erro sistemático.

Determinado o valor limite em questão, os períodos de 1963 a 1964 (anos tido pela literatura como extremamente secos) tiveram o comportamento de AH, do PDSI original e do PDSI adap estudados separadamente. Foram ainda calculadas as frequências de ocorrência das novas classes do PDSI adap para todas as localidades do estudo.

3.2.5 Avaliação da metodologia base do SPI (teste de aderência)

Segundo Assis et al. (1996), o teste do qui-quadrado é aplicado para verificar o ajuste de uma distribuição de probabilidade conhecida a uma amostra de dados com distribuição desconhecida.

Nesse teste a hipótese de nulidade (H_0) admite que séries históricas de precipitação podem ter sua distribuição ajustada a função gama incompleta (ASSIS et al.,1996). H_0 é

testado comparando-se as frequências observadas e as frequências teóricas, de cada intervalo de valores por meio da equação desenvolvida por Campos (1979).

$$X^2 = \sum_1^a \left(\frac{(foi - fei)^2}{fe_i} \right) \quad (54)$$

Sendo:

a - número de intervalo de valores de precipitação pluvial;

fo_i - frequência observada; e

fe_i - frequência esperada.

X^2 tem uma distribuição com um único parâmetro, o grau de liberdade (GL) que é dado pela subtração entre a-1 e o número de parâmetros da distribuição adotada (no caso a gama incompleta). Deve-se ainda reunir em uma única classe, os intervalos de valores que tenham frequência esperada menor do que três. Magnitudes de X^2 maiores que os valores tabelados (valor crítico) levam à rejeição de Ho (ASSIS et al, 1996).

Ainda segundo Assis et al., (1996), o teste de Kolmogorov – Smirnov também é aplicado para verificar se os valores de uma série histórica podem ser considerados como provenientes de uma população com distribuição teórica preestabelecida, sob a hipótese da nulidade Ho. O teste é definido por:

$$D_{\max} = \text{Max} \left| F'(x) - F(x) \right| \quad (55)$$

$$F(x) = fa/(n+1) \quad (56)$$

Sendo:

$F'(x)$ - função distribuição de probabilidade teórica;

$F(x)$ - função distribuição de probabilidade empírica;

f_a - frequência acumulada de cada classe;

n - número de classes de valores de chuva pre-estabelecidos.

Se ao nível de significância estabelecido, o valor observado de D_{\max} for maior ou igual ao valor tabelado (valor crítico), a hipótese de nulidade (H_0) de que os dados amostrais provém de uma população com distribuição gama é rejeitada.

Tendo em vista que o SPI tem, como base de sua metodologia, o ajuste de uma série histórica de chuva à distribuição gama incompleta, tais ferramentas foram aplicadas para todas as localidades apresentadas na Tabela 3, a fim de se verificar se tais séries mensais de precipitação poderiam ser ajustadas à função gama incompleta. Os testes foram aplicados para os meses de Janeiro, Julho e Outubro.

Foram ainda efetuadas regressões lineares entre valores do SPI e as respectivas precipitações que os geraram (nas treze localidades desse estudo), a fim de verificar se o comportamento desse índice, em relação ao da chuva, pode ser aproximado ao comportamento linear.

3.2.6 Comparação do comportamento do SPI e da Anomalia Hídrica (AH)

Foram realizadas regressões lineares entre valores de AH e do SPI, agrupados em meses iguais, para as localidades de Campinas, Jaú, Jundiaí, Mandurí, Mococa, Pindorama, Piracicaba, Ribeirão Preto, Tatuí e Ubatuba. O comportamento do SPI em relação ao do AH nas escalas de tempo mensal e anual, foi estudado nos anos de 1963 e 1964.

3.2.7 Estudo da influência de mudanças no período de calibração do SPI

Entende-se por período de calibração do SPI a série histórica usada para determinar os parâmetros alfa e beta da distribuição Gama e a probabilidade de ocorrência de precipitação igual a zero. Com isso, as localidades de Campinas, Pindorama e Mandurí tiveram o SPI Mensal e Anual calculados com base em diferentes séries históricas (Tabela 4) a fim de verificar se diferentes séries de calibração afetam a magnitude do SPI em um mesmo período de análise:

Tabela 6 – Diferentes períodos de calibração para estimativa de valores do SPI nas regiões de Campinas, Mandurí e Pindorama.

Local	Série histórica (Períodos de Calibração)
Campinas	1890 a 2003; 1960 a 2003 e 1970 2003
Manduri	1960 a 2003 e 1971 a 2003
Pindorama	1951 a 1994 e 1971 a 2003

Os resultados foram comparados por meio do coeficiente de determinação (R^2), do coeficiente da inclinação de reta de tendência gerada por tal regressão, pelo intercepto desta e ainda por meio do índice de concordância de Wilmott et al., (1985).

3.2.8 Análise da frequência de ocorrência das categorias de seca definidas pelo SPI

Segundo Hayes et al., (1999), por se ajustarem à distribuição normal, pode-se esperar, em uma longa série histórica, que 68% dos valores do SPI estejam entre 1 e -1, 95% dos valores estejam entre 2 e -2 e 99% dos valores estejam entre três e menos três. Tendo em vista essa afirmação, a frequência de ocorrência das classes definidas na Tabela 2 foi calculada para a média das treze localidades desse estudo e para cada região separadamente, a fim de verificar se tal afirmação pode ser aplicada ao Estado de São Paulo.

3.2.9 Comparação entre a metodologia do PDSI adap e a do SPI

O índice Z de anomalia hídrica e o SPI mensal quantificam as condições de umidade de um determinado mês em uma dada região sem a influência de meses precedentes. Tendo em vista tal fato, foram realizadas regressões lineares entre esses dois índices a fim de se verificar a coerência entre esses dois métodos.

Foi ainda calculada a correlação entre a metodologia de Palmer (1965) e a do SPI em diversas escalas de tempo a fim de verificar a existência de uma memória inerente ao PDSI e ao PDSI adap no Estado de São Paulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das Adaptações do Índice de Severidade de Seca de Palmer

O primeiro ponto que merece destaque na adaptação do PDSI é o aumento que o produto DK' médio para o Estado de São Paulo (22,80) apresentou em relação ao produto DK' médio da metodologia original (17,67), conseqüente ao maior valor de D apresentado pelas localidades paulistas.

Sendo D a média da soma dos valores absolutos de d, sua magnitude representa um desvio médio dos valores observados de precipitação mensal em relação aos valores de P também em base mensal para uma dada localidade. A maior magnitude no valor de D demonstra uma maior variabilidade temporal da precipitação média no Estado de São Paulo em relação às nove localidades utilizadas na metodologia original.

Um outro aspecto que pode ser observado é o desvio padrão que cada produto DK' médio possui em relação aos dados que os geraram. A média 17,67 possui um desvio padrão de 2,60 e um coeficiente de variação de 14,7%. Já a média para o Estado de São Paulo (22,80) possui um desvio padrão de 0,18 e um coeficiente de variação de 0,8%.

Os valores relativamente altos do desvio padrão e do coeficiente de variação apresentados pela média do trabalho original de Palmer (1965), podem ser uma das causas que levaram Alley (1984) a afirmar que o PDSI não pode ser, em nível nacional, considerado uma ferramenta padronizada de monitoramento da seca. Tal fato não foi observado para a

média das 6 localidades base do Estado de São Paulo, indicando que o PDSI adap pode ser utilizado para tal finalidade.

A magnitude de 22,80 foi ainda usada para o cálculo do desvio padrão (0,70) e do coeficiente de variação (3,1%) para as 12 localidades em questão. Apesar de um pequeno aumento, tais parâmetros continuam ainda bem abaixo dos valores observados no trabalho original de Palmer (1965).

Os baixos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação apresentados pela metodologia adaptada demonstram que o fator K uniformizou ou padronizou o desvio médio (D) dos valores observados de precipitação nas diferentes regiões do Estado de São Paulo. Tal característica resulta em uma maior confiabilidade do PDSI adap em relação ao PDSI como ferramenta de comparação de condições hídricas de diferentes locais no Estado de São Paulo.

O coeficiente (R^2) de determinação gerado por uma regressão linear entre índices z acumulados (baseados no fator k) e seus respectivos números de meses de ocorrência para os períodos que geraram as equações 48 foi de 0,87 indicando uma taxa de variação constante do índice z independente do local e do número de meses de ocorrência. O coeficiente (R^2) calculado para os novos índices Z (gerados a partir do fator K reavaliado e base da equação 50) para os mesmos períodos foi de 0,91.

Diferentes locais, submetidos a uma dada intensidade de seca, podem estar sujeitos a diferentes déficit d de precipitação (Karl, 1986). Tendo em vista esse fato, os fatores k e K foram desenvolvidos para serem ferramentas de padronização climática, assim para uma

mesma intensidade de seca, diferentes déficit d de diferentes locais ou épocas quando multiplicados pelo seus respectivos fatores de padronização (k ou K) devem apresentar um produto (z ou Z) com magnitude semelhante.

A ligeira melhora no coeficiente de determinação demonstra que o índice Z homogeneizou melhor, em escala temporal e espacial, os períodos secos de 1961, 1963 e 1964 do que o índice z nas localidades base desse estudo. Tal fato, aliado ao alto valor de R^2 (0,91), além de ser um indicativo de que o PDSI adap é um quantificador de seca padronizado no tempo e no espaço, podendo ser comparado em diferentes épocas e em diferentes locais do Estado de São Paulo, indica também que a equação 50 (baseada no índice Z) ajustou-se melhor às condições climáticas para as quais foi desenvolvida do que a equação 48, que tem como base o índice z .

Os coeficientes de determinação (R^2) gerados pela regressão linear resultantes da comparação entre valores de AH, valores do PDSI e valores gerados pelas diferentes adaptações do índice de Palmer para toda a série histórica das seis localidades base são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de determinação gerado por regressões lineares entre AH e o PDSI, AH e x, AH e X', AH e X e, AH e PDSI adap para as seis localidades consideradas base.

Local	Valores de R ²				
	PDSI	x	X'	X	PDSI adap
Campinas	0,21	0,63	0,65	0,65	0,67
Jaú	0,23	0,63	0,64	0,64	0,66
Mococa	0,25	0,55	0,61	0,61	0,65
Piracicaba	0,24	0,69	0,69	0,69	0,69
Rib.Preto	0,20	0,52	0,59	0,59	0,62
Tatuí	0,28	0,74	0,73	0,73	0,75

As adaptações propostas (x, X', X e PDSI adap) apresentaram uma melhora significativa na magnitude de R² quando comparadas ao índice original, demonstrando uma maior sensibilidade a mudanças no regime climático. O PDSI adap foi a ferramenta que apresentou os maiores valores do coeficiente de determinação, sendo com isso adotado como padrão para os demais testes de adaptação, como é demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficiente de determinação gerado pela regressão linear entre AH e PDSI adap e entre AH e PDSI para as demais localidades utilizados nesse estudo.

Local	Valores de R²	
	PDSI	PDSI adap
Jundiaí	0,24	0,72
Mandurí	0,26	0,77
MteAlegre	0,26	0,74
Pindorama	0,25	0,66
Pariquera	0,26	0,78
Ubatuba	0,26	0,74

Analisando as Tabelas 7 e 8, nota-se que o PDSI adap apresentou uma melhora significativa na magnitude de R² nas doze localidades acima evidenciadas, quando comparado ao PDSI original. Tal fato demonstra que o índice adaptado é mais sensível a mudanças no regime hídrico no Estado de São Paulo do que o original.

Tal diferença de sensibilidade pode ser entendida ao comparar-se a equação 27 da metodologia original à equação 50 do PDSI adap. Na primeira, apenas um terço do déficit atual de precipitação Z e quase nove décimos do valor do PDSI do mês precedente são considerados, enquanto nessa última expressão, Z tem sua influência acrescida em 6,4% e apenas 1,5 décimos do valor do PDSI adap do mês precedente é considerado. Com isso, a equação 50 do PDSI adap não apresenta a memória exagerada inerente ao PDSI original.

Os coeficientes R² de determinação gerados pela regressão linear o entre PDSI e AH, e entre PDSI adap e AH, agrupados por meses iguais, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficiente de determinação (R^2) gerado pela regressão linear entre AH e PDSI e AH e PDSI adap, separados por meses iguais.

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

O PDSI adap quando comparado a valores de AH agrupados por meses iguais, apresentou uma melhora bastante significativa na magnitude de R^2 nas 12 localidades apresentadas na Tabela 9, quando comparado ao PDSI.

Os altos valores de R^2 apresentados na Tabela 9 demonstram a sensibilidade do índice adaptado a mudanças no regime hídrico de uma região independente do mês em estudo. Tal sensibilidade, torna o PDSI adap uma ferramenta mais adequada para quantificar as condições hídricas de uma região na escala mensal.

A localidade de Ubatuba apresentou valores de R^2 próximos à unidade, indicando que o PDSI adap pode ser utilizado na parte litorânea do Estado.

4.2 Determinação do Início/Fim de Uma Seca de Acordo com o PDSI adap

O índice de concordância de Willmott e o coeficiente R^2 gerado pela regressão linear entre a relação ETR/ETP, que seria obtida em um balanço hídrico seqüencial considerando que a precipitação ocorrida fosse igual a Pesp, e a média mensal da relação ETR/ETP para os anos de 1961 a 1990 (valor climatológico esperado para um mês sob condições hídricas normais em uma região) são demonstrados na Tabela 10 para os valores limites de -1 e -0,5.

Tabela 10 – Índice de concordância de Willmott e coeficiente de determinação entre a relação ETR/ETP média e a relação ETR/ETP gerado por P esp para os valores limites de -1 e -0,5.

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

O valor limite -1 apresentou resultados pouco satisfatórios para a localidade de Tatuí nos anos de 1961 e 2003 e para a localidade de Campinas no ano de 2003. Já o valor limite -0,5 apresentou resultados satisfatórios em todas as localidades e em todos os períodos.

Nota-se, 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 mais próxima ao valor climatologicamente esperado para o mês em questão nas regiões consideradas. Com isso, tal valor foi escolhido como patamar de início (quando o índice fica abaixo deste) ou fim (quando o índice o iguala ou o supera) de uma seca, a qual de acordo com o PDSI adap, é

definida quando a relação ETR/ETP de um mês não atinge o valor esperado para o local em questão. Desta maneira, observa-se que a escala de tempo de estudo inerente ao novo índice é a mensal. Tal fato corrobora com as críticas feitas por Guttman (1998) à metodologia original de Palmer (1965), que apesar de também utilizar apenas um único valor do índice para indicar o início/fim de uma seca, não possui uma escala de tempo definida de análise.

Nesse ponto, deve-se ressaltar que as relações ETR/ETP calculadas com base na chuva necessária para trazer o PDSI adaptado ao valor de $-0,5$, foram geradas a partir das temperaturas observadas nos meses em questão, isto é, períodos submetidos à seca. Entretanto, se a chuva ocorrida em tais períodos fossem iguais a Pesp (valor maior de precipitação do que o ocorrido em meses submetidos à seca), a temperatura média de tais intervalos de tempo em questão tenderia a ser mais baixa, resultando em menores valores de evapotranspiração potencial e conseqüentemente em maiores valores da relação ETR/ETP. Devido ao fato do PDSI adaptado ser desenvolvido na escala mensal e ter uma proposta de análise climática regional, tal limitação não é significativa, entretanto, o uso dessa metodologia em escalas de tempo menores do que um mês deve ser visto com ressalvas.

É interessante ressaltar as críticas feitas por Alley (1984) e Karl (1986) quando afirmam que a metodologia desenvolvida por Palmer (1965) para se detectar o início/fim de uma seca dificulta o uso do PDSI como ferramenta para o monitoramento em tempo real das condições hídricas de uma região. A definição do valor limite de $-0,5$ torna o PDSI adaptado uma ferramenta consistente para o monitoramento hidrológico de uma região próximo ao tempo real, pois dispensa o uso da equação 28, a qual dificulta o uso da metodologia de Palmer (1965) no monitoramento das condições climáticas de uma região.

Tal característica acima citada, aliada à determinação da escala de tempo inerente ao novo índice e ao fato de uma seca se iniciar, de acordo com o novo índice quando a relação ETR/ETP de um mês está abaixo do valor climatologicamente esperado de uma região, corroboram com as críticas feitas por Alley (1984), Karl (1986) e Hayes et al (1999) que afirmam que, por usar regras arbitrárias para definição do início/fim de uma seca e por não possuir uma escala de tempo de análise definida, o PDSI apresenta uma interpretação de seus resultados bastante difícil.

Segundo Hayes et al., (1999), o tempo de detecção do início de uma seca é de suma importância no combate de tal fenômeno. Em outras palavras, um índice que acusa o início de uma seca com maior rapidez que outro, pode ser considerado uma ferramenta mais apropriada para o monitoramento das condições hídricas de uma região.

Na Figura 1 o estudo do comportamento do PDSI, PDSI adap e de AH para os anos de 1963/64 para a região de Campinas - SP é apresentado.

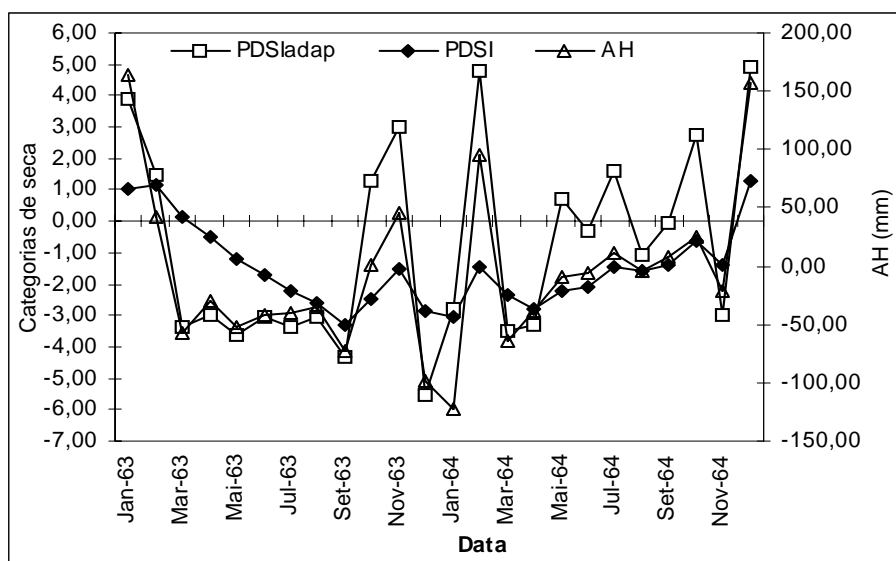


Figura 1 -Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Campinas – SP nos anos de 1963/64

Analisando a Figura 1, nota-se que o PDSI torna-se inferior ao 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 (-0,5), permitindo com isso a adoção mais rápida de medidas mitigatórias.

Nota-se ainda, na Figura 1, uma maior semelhança no comportamento de AH e do PDSI adap em relação à AH e o PDSI. Essa tendência é também observada na localidade de Jaú. (ver Figura 2)

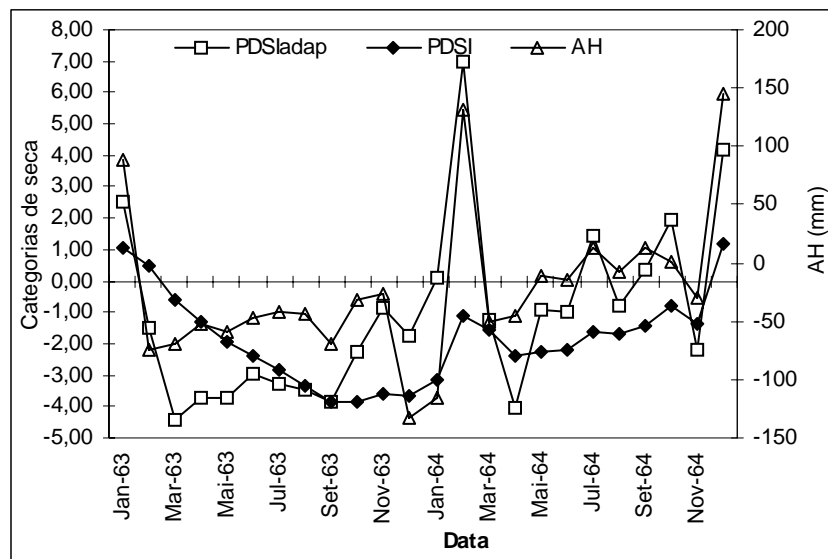


Figura 2- Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Jaú – SP nos anos de 1963/64

Na localidade de Jaú, a seca de 1963/64 é detectada pela metodologia original em abril de 1963, ao passo que o novo índice a detecta em fevereiro do mesmo ano. Esse estudo é também apresentado para outras localidades do Estado nas Figuras 3 e 4.

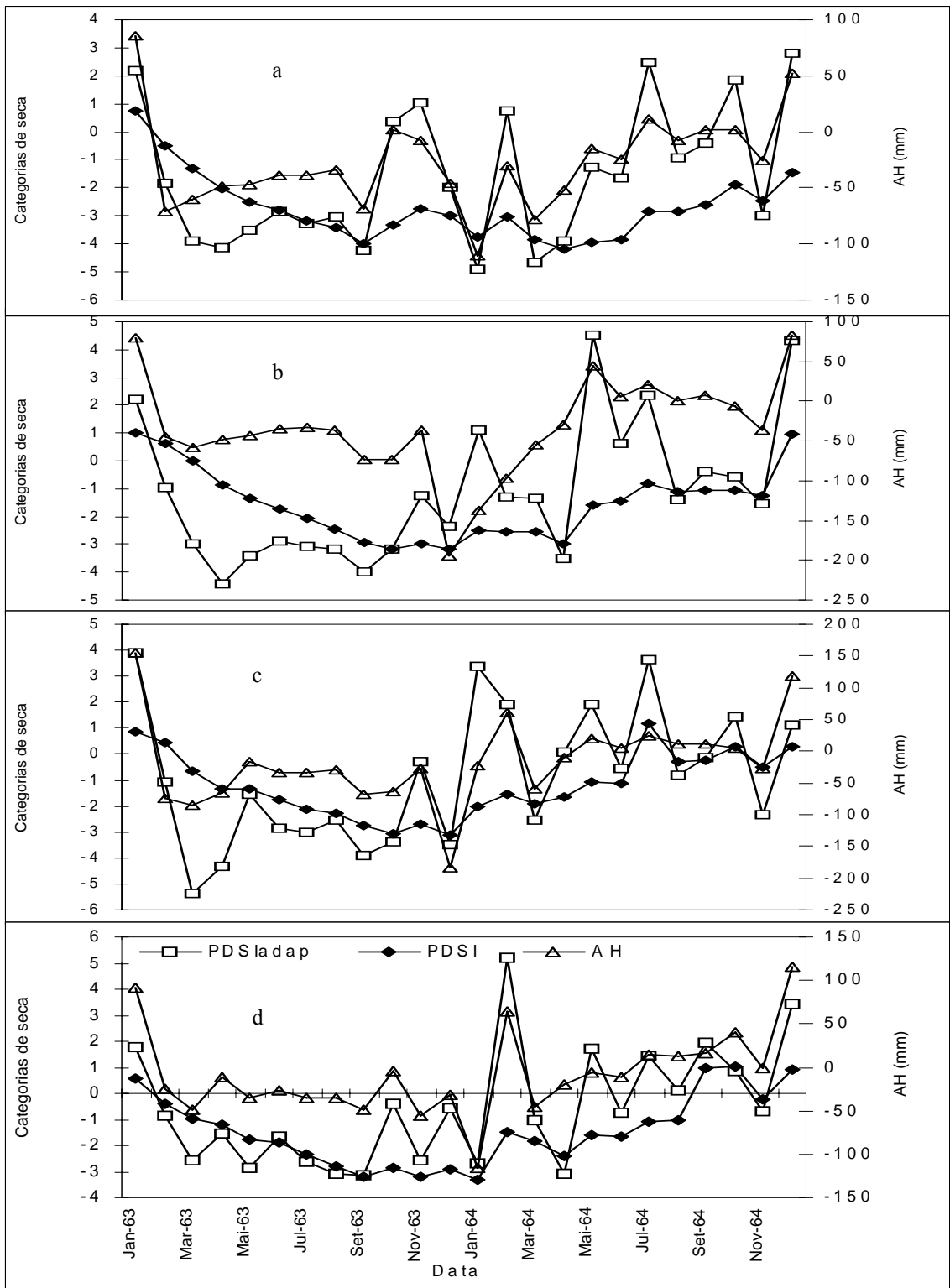


Figura 3- Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Mococa (a), Piracicaba (b), Ribeirão Preto (c) e Tatuí (d) nos anos de 1963/64

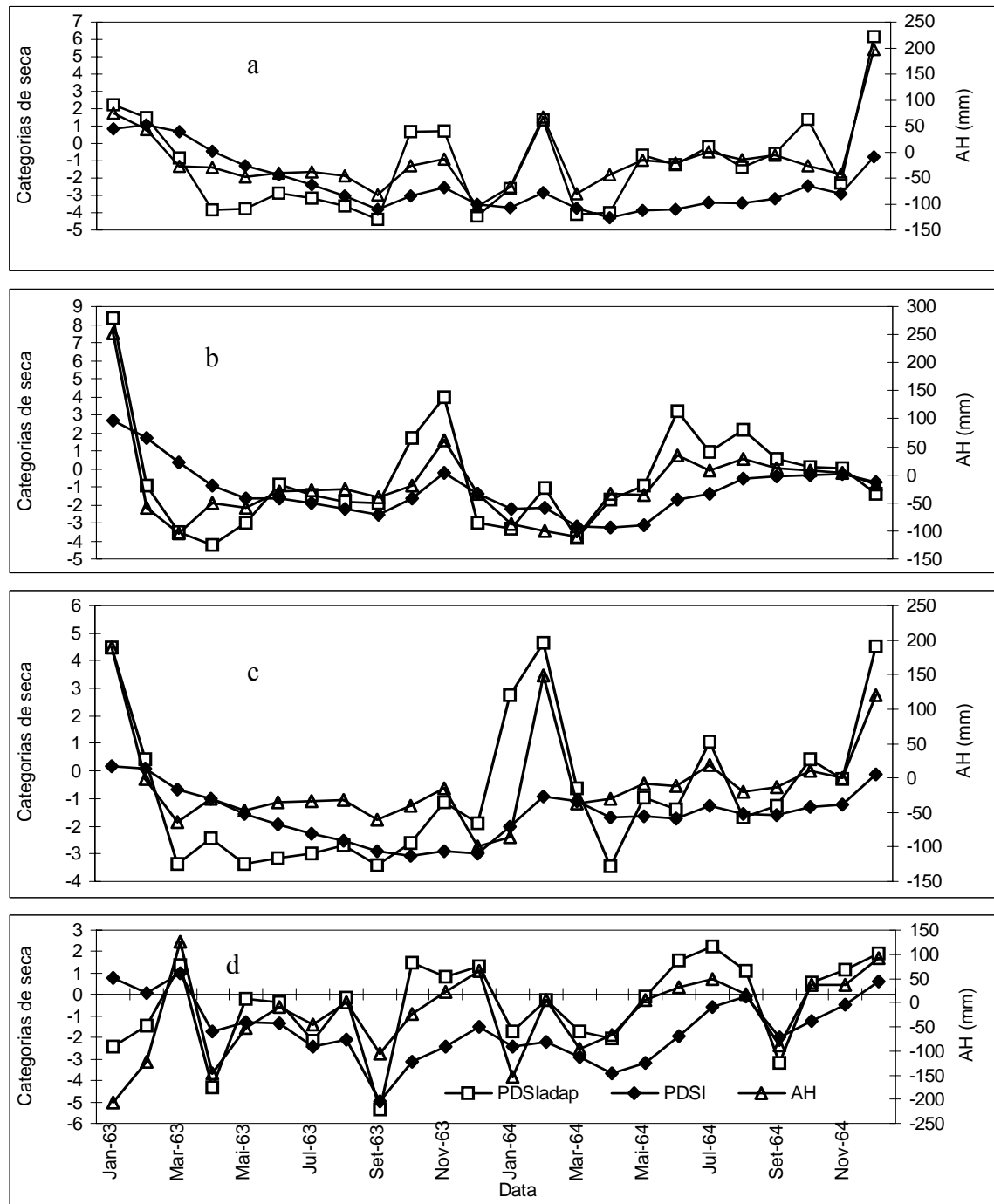


Figura 4 - Variação do comportamento de AH, do PDSI e do PDSI adap para a localidade de Pariquera-Açú (a), Monte Alegre do Sul (b), Pindorama (c) e Ubatuba (d) nos anos de 1963/64.

Analisando-se as Figuras 3 e 4, nota-se, com exceção à localidade de Ubatuba, que o PDSI adap detecta a seca com pelo menos um mês de antecedência em relação ao PDSI, o que

torna, o novo índice, uma ferramenta mais apropriada para o monitoramento das condições hídricas de uma região.

Na localidade de Ubatuba, o efeito da memória exagerada inerente ao índice original é evidenciado no período de Abril a Julho de 1964. No primeiro mês desse período, a região apresentava uma condição hídrica seca, com AH igual a -80 mm, PDSI adap igual a -2 e PDSI aproximado a -4. Houve, entretanto, uma recuperação bastante significativa no mês de maio, o qual apresentou AH próximo de 6 mm. Tal recuperação foi detectada pelo PDSI adap que apresentou um valor bastante próximo a 0 (acima do valor limite de seca), porém, o PDSI ainda apresentava um valor um pouco abaixo de -3 (seca extrema). Esse último índice só detectou o fim da seca em julho de 1964, quando AH já atingia 50 mm e o PDSI adap já indicava um valor superior a 2.

As mudanças abruptas de valores do PDSI adap (como a evidenciada acima entre os meses de Abril e Junho na localidade de Ubatuba), corroboram com as observações feitas por Heim Junior (2002), quando afirma que uma seca meteorológica pode se desenvolver rapidamente e chegar ao fim abruptamente.

Dessa maneira, pode-se afirmar que o PDSI adap é um quantificador de seca meteorológica, com uma escala de tempo mensal de análise hídrica e que indica o início/fim dessa anomalia quando a relação ETR/ETP de uma região torna-se inferior/superior ao valor climatologicamente esperado (médio) dessa mesma relação, em um determinado mês.

4.3 Classes de Seca do PDSI adap

Devido ao fato do PDSI adap ter demonstrado um comportamento bastante diferenciado em relação ao PDSI, julgou-se necessário à adoção de novas classes de seca relacionadas a essa nova ferramenta. Na Tabela 11 são demonstradas as novas categorias definidas com base no valor limite utilizado como indicativo de seca extrema (-3).

Tabela 11 – 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

Determinadas tais classes, a frequência de ocorrência de cada categoria é apresentada na Figura 5 para a média de todas as seis localidades base desse estudo e separadamente na Figura 6 para as localidades de Campinas, Jaú, Ribeirão Preto e Tatuí com séries históricas homogêneas (1960 a 2003).

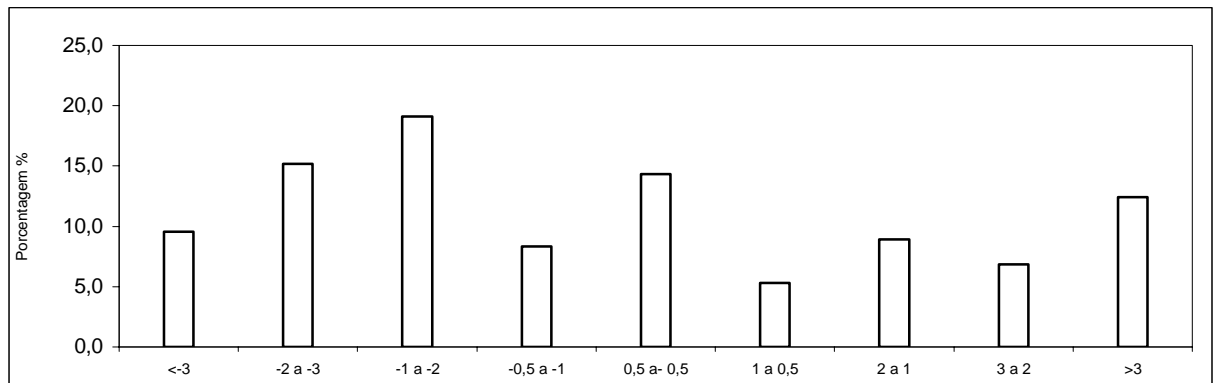


Figura 5 - Frequência de ocorrência média das classes arbitrárias do PDSI adap para as localidades base desse estudo.

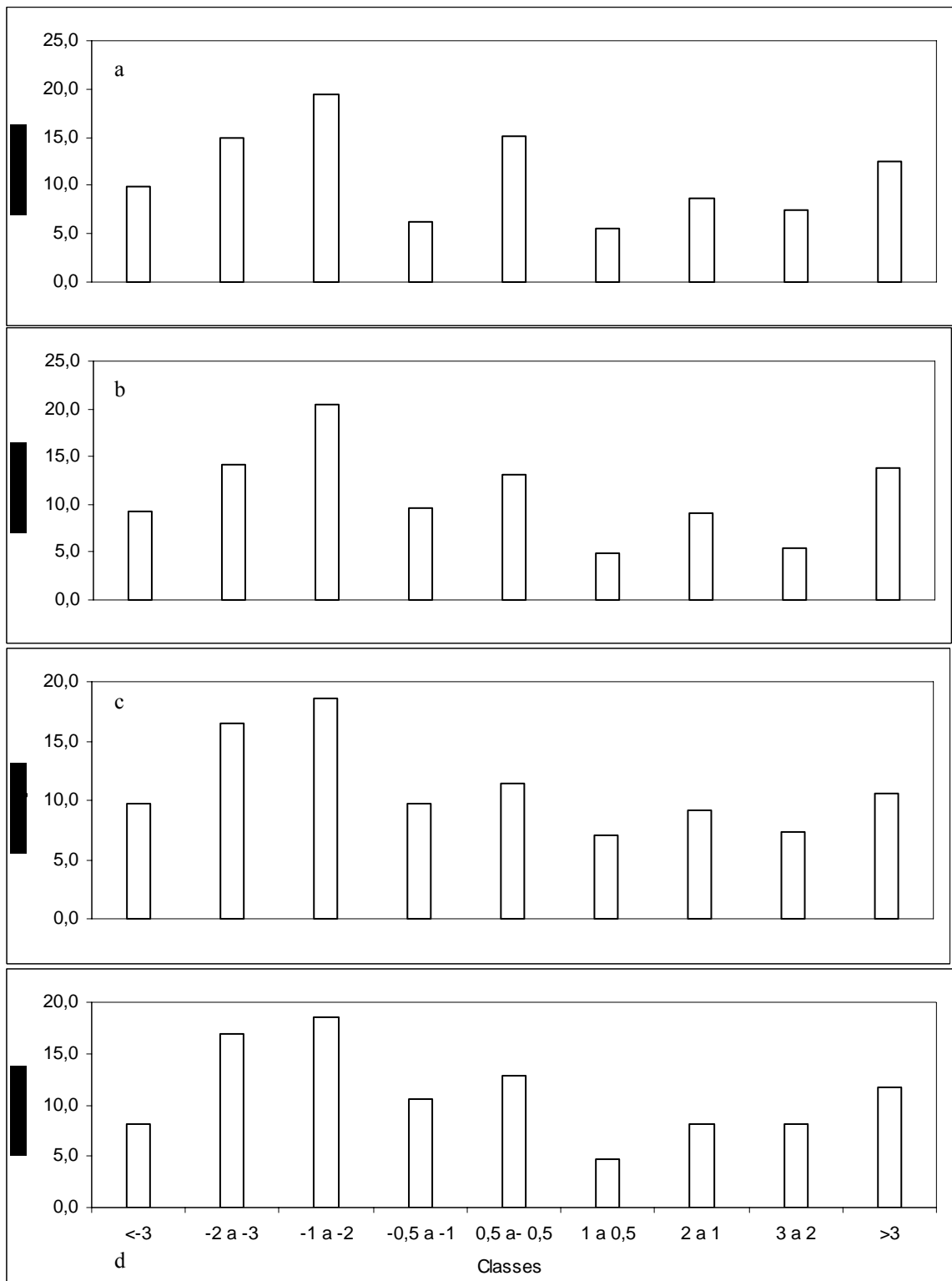


Figura 6 - Frequência de ocorrência das classes arbitrárias do PDSI adap para as localidades de Campinas (a), Jaú (b), Ribeirão Preto (c) e Tatuí (d).

Como primeira análise das Figuras 5 e 6, nota-se que os casos de seca extrema, apontados pelo PDSI adap, além de ocorrerem com frequência menor do que 10% em todas as regiões do Estado, o que demonstra que o valor -3 é adequado para indicar tais eventos, apresentam ainda porcentagens de ocorrência semelhantes nas diversas localidades do Estado de São Paulo. Nota-se, também, que tal característica é consequência do fato de secas extremas serem detectadas, pelo uso do Índice de Palmer adaptado, concomitantemente nas diferentes regiões do Estado, corroborando com a observação de Hayes et al., (1999), quando dizem que um índice útil para decisões governamentais de combate à seca deve indicar casos extremos e severos concomitantemente e raramente em vastas regiões de um país.

Outra característica que pode ser notada nas Figuras 5 e 6 é o fato dos eventos secos (PDSI adap menor que $-0,5$), ocorrerem com uma frequência ligeiramente maior do que eventos normais ou úmidos (52,2% secos e 47,8% normais ou úmidos), indicando que, as diversas regiões do Estado de São Paulo, encontram-se mais frequentemente em condições hídricas ligeiramente abaixo da normal.

É interessante ressaltar que, além da metodologia do índice em questão utilizar a média aritmética dos parâmetros do Balanço Hídrico (em um longo período de análise) para estimar fatores como a precipitação climatologicamente apropriada (**P**) e o fator K de caracterização climática, o início de uma seca é definido quando a relação ETR/ETP de um dado mês cai abaixo do valor médio mensal para o período em questão.

O fato de as classes de seca apresentarem maior frequência de ocorrência é um indicativo de que valores iguais ou superiores à média mensal de precipitação nas diversas

regiões do Estado ocorram com uma frequência menor do que 50% , já que esse é o elemento com maior influencia no valor final do índice de Palmer.

Moraes et al., (2001) detectaram que, na região de Lavras – MG, o valor médio de precipitação mensal não é apropriado para projetos de irrigação por apresentar uma frequência de ocorrência menor do que 50%. Essa mesma análise foi realizada nas 13 localidades desse estudo obtendo-se resultados semelhantes aos de Mores et al (2001), como exemplifica a Tabela 12 para a localidade de Campinas.

Tabela 12 – Média mensal de precipitação (mm) e frequência de ocorrência da mesma para, a região de Campinas.

Mês	Precipitação Média (1960-2003, mm)	Ocorrência de valores iguais ou superiores à média (%)
Março	148	43
Julho	32	32
Outubro	121	48
Dezembro	225	41

O fato de valores iguais ou superiores à média de chuva em uma determinada região ocorrerem em menos de 50% dos casos, além de ser a razão do PDSI adap apresentar uma frequência maior de eventos secos do que úmidos, pode ser também uma das razões que levaram autores como Dale et al (1968), Mckee et al. (1993), Ávila (1994) e Cunha et al. (1997), entre outros, a não utilizarem a distribuição normal para descrever o regime mensal de precipitação de uma determinada região.

Assim, o uso de valores médios tanto na metodologia de Palmer (1965) como na do PDSI adap pode inserir em um requerimento relativamente exagerado de chuva para que tais índices indiquem condições hídricas normais em uma região.

A maioria dos casos de seca extremas (54%) ocorrem entre os meses de Novembro a Março. Tal característica também foi observada por Santos e Pereira (1999) quando afirmam que eventos de maior intensidade de seca ocorrem com maior frequência na estação chuvosa da região oeste de Estado de São Paulo.

Ao analisarem os resultados gerados pela equação 41, Santos e Pereira (1999) concluem que tal expressão tende a superestimar a severidade do índice, quando a precipitação pluvial observada em um mês é razoavelmente menor do que a precipitação **P** em questão. Tais autores chegaram a essa conclusão devido ao valor de $-28,26$ apontado pela equação 41 na localidade de Araçatuba em 1996. Tal característica não foi observada no PDSI adap, já que o valor mais baixo registrado por esse último índice foi o de $-7,2$ ocorrido na região de Piracicaba em Dezembro de 1972.

4.4 Avaliação do SPI

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 ao nível de significância de 5% no Estado de São Paulo.

Tal afirmação é baseada no fato de todas localidades em todos os meses submetidos às ferramentas acima citadas terem aceitado a hipótese de nulidade (H_0), indicando que os dados amostrais provêm de uma população com distribuição gama.

A análise de regressão linear entre a precipitação e valores do SPI para as treze localidades desse estudo nas séries históricas, discriminadas na Tabela 3 resultaram em coeficientes (R^2) bastante altos em todas as regiões nas diversas escalas de tempo de estudo do SPI. As Tabelas 13, 14 e 15 mostram um exemplo da magnitude desses coeficientes nas localidades de Campinas, Ubatuba e Votuporanga, respectivamente.

Tabela 13 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores do SPI, para a região de Campinas.

Mês	Coeficiente (R^2) de determinação			
	SPI Mensal	SPI 3 Meses	SPI 6 Meses	SPI 12 Meses
Janeiro	0,96	0,99	0,96	0,99
Fevereiro	0,94	0,99	0,99	0,99
Março	0,96	0,97	0,99	0,99
Abril	0,95	0,98	0,99	0,99
Mai	0,83	0,80	0,99	0,99
Junho	0,96	0,88	0,98	0,99
Julho	0,92	0,86	0,98	0,99
Agosto	0,89	0,92	0,96	0,99
Setembro	0,90	0,86	0,91	0,99
Outubro	0,93	0,97	0,96	0,99
Novembro	0,97	0,99	0,99	0,99
Dezembro	0,97	0,99	0,99	0,99

Tabela 14 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores do SPI, para a região de Ubatuba.

Mês	Coeficiente (R^2) de determinação			
	SPI Mensal	SPI 3 Meses	SPI 6 Meses	SPI 12 Meses
Janeiro	0,97	0,91	0,92	0,99
Fevereiro	0,88	0,94	0,91	0,99
Março	0,97	0,98	0,96	0,99
Abril	0,97	0,97	0,98	0,99
Mai	0,89	0,89	0,99	0,99
Junho	0,91	0,97	0,99	0,99
Julho	0,91	0,96	0,98	0,99
Agosto	0,82	0,95	0,98	0,99
Setembro	0,99	0,94	0,97	0,99
Outubro	0,99	0,91	0,97	0,99
Novembro	0,98	0,95	0,98	0,99
Dezembro	0,98	0,91	0,95	0,99

Tabela 15 – Coeficiente de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre o total de precipitação e os valores es do SPI, para a região de Votuporanga.

Mês	Coeficiente (R^2) de determinação			
	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12
Janeiro	0,99	0,99	0,98	0,99
Fevereiro	0,94	0,99	0,99	0,99
Março	0,93	0,99	0,99	0,99
Abril	0,93	0,98	0,99	0,99
Mai	0,83	0,99	0,99	0,99
Junho	0,89	0,95	0,99	0,99
Julho	0,90	0,90	0,99	0,99
Agosto	0,94	0,90	0,98	0,99
Setembro	0,86	0,91	0,93	0,99
Outubro	0,91	0,95	0,95	0,99
Novembro	0,97	0,97	0,96	0,99
Dezembro	0,98	0,98	0,98	0,99

Apesar dos altos valores de (R^2) apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15, o comportamento do SPI, em uma longa série histórica e em especial em pequenas escalas de tempo, não pode ser aproximado ao linear, como é exemplificado na Figura 7 (no mês de Maio) para a escala mensal e na Figura 8 para a escala trimestral (Maio a Julho).

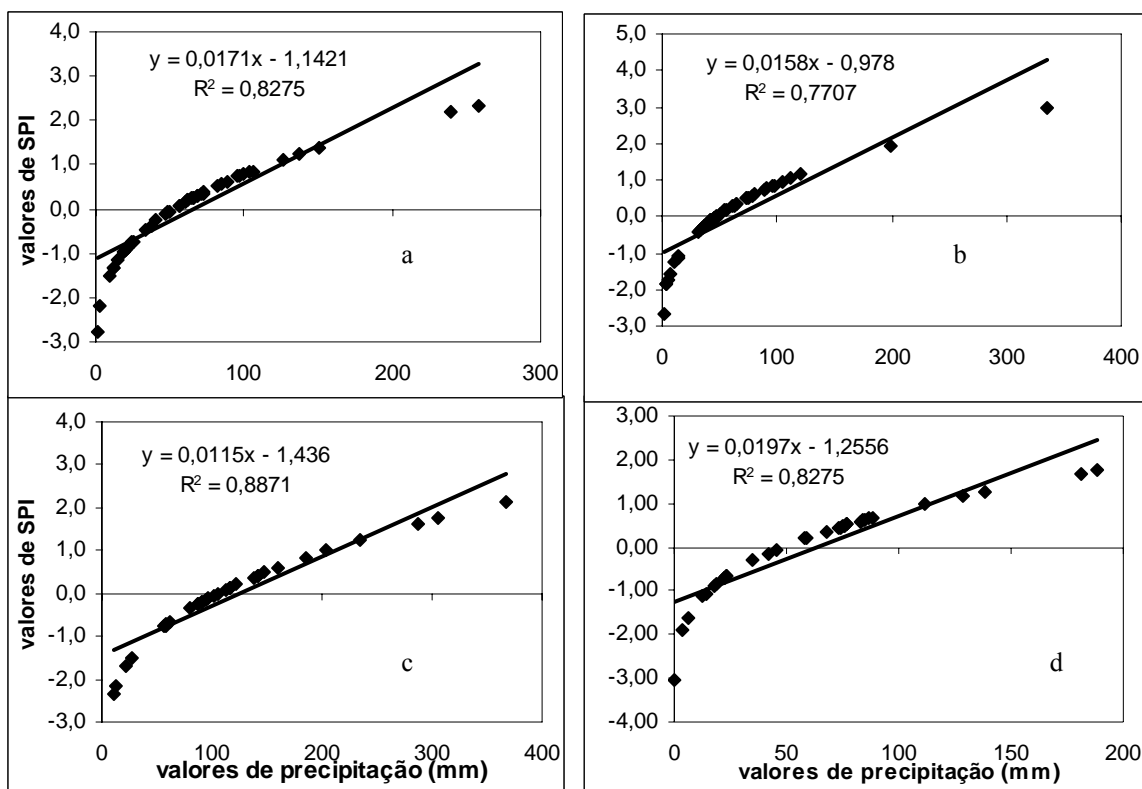


Figura 7 - Equação da reta de tendência e coeficiente de determinação entre valores do SPI 1 e valores de precipitação que os geraram para as localidades de Campinas (a), Piracicaba (b ao lado), Ubatuba (c) e Votuporanga (d) no mês de Maio.

A análise da Figura 7 pode ser feita por meio da equação 58 que descreve a equação de regressão linear entre valores do SPI 1 e os totais de precipitações que os geraram (Figura 7a).

$$\text{SPI}' = 0,0171 * (\text{chuva}) - 1,1421 \quad (58)$$

Sendo:

(chuva) - valor de precipitação pluvial, em milímetros, observada nos meses de maio.

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

O intercepto da equação 58 é igual a $-1,1421$, indicando com isso que um valor zero de chuva resultaria em um SPI' moderadamente seco (Tabela 2). Entretanto, nota-se na Figura 7a que 1 mm de chuva resultou em um SPI igual à $-2,76$ (seca severa). Tal fato demonstra que, na escala mensal, o SPI não pode ter seu comportamento aproximado ao linear. Em outras palavras, o Índice Padronizado de Precipitação na escala de tempo em questão, não apresentou uma variação linear em relação à precipitação, especialmente para valores extremos.

A Figura 8 é outro exemplo de que mesmo na escala de tempo trimestral, o SPI não apresenta uma variação linear em relação à precipitação.

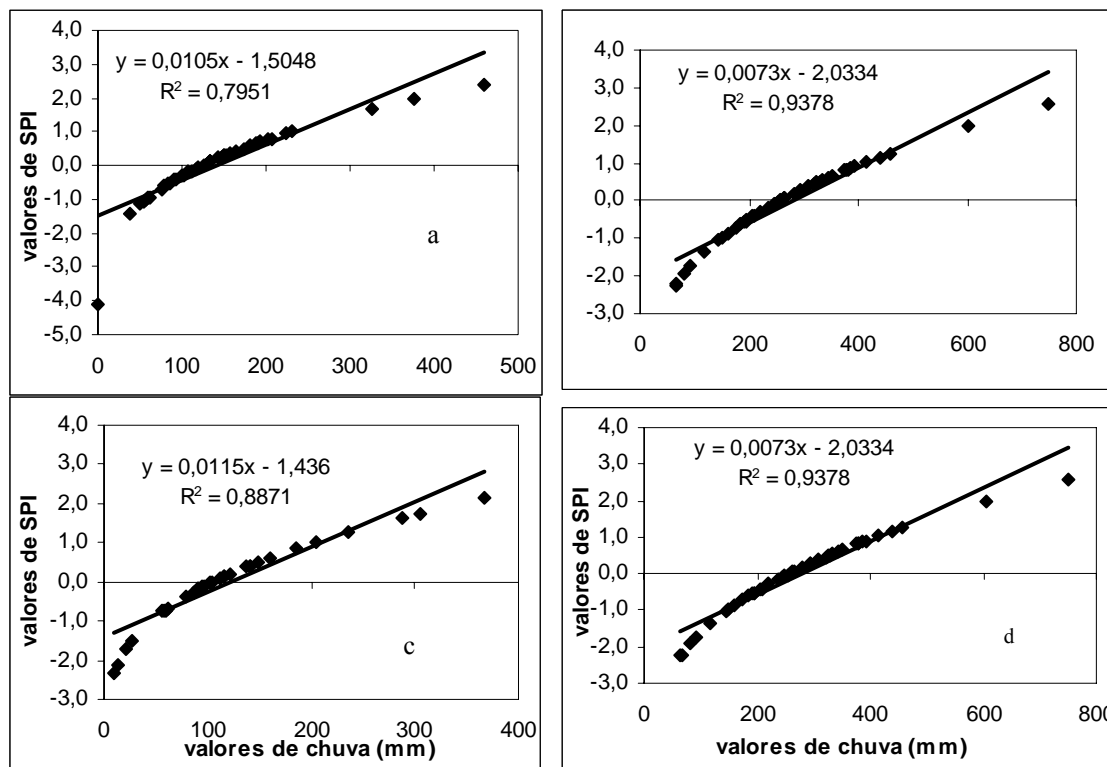


Figura 8 - Equação da reta de tendência e coeficiente de determinação do SPI 3 e valores de precipitação que os geraram para as localidades de Campinas (a), Piracicaba (b ao lado), Ubatuba (c) e Votuporanga (d) no mês de Julho.

Como realizado anteriormente, a análise da Figura 8 pode ser feita por meio da equação 59 apresentada na Figura 8a.

$$SPI' = 0,0105*(chuva) - 1,5048 \quad (59)$$

Sendo:

(chuva) - valor de precipitação pluvial, em milímetros observada, no trimestre – Abril/Maio.

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

O intercepto da equação 59 é igual a $-1,5048$, indicando com isso que um valor zero de chuva resultaria em um SPI' muito seco (Tabela 2). Entretanto, nota-se na Figura 8a que um milímetro de chuva resultou em um SPI igual a $-4,1$ (seca severa registrada no ano de 1963 na região de Campinas). Tal característica demonstra que, também na escala trimestral, o SPI não pode ter seu comportamento aproximado ao linear; fato esse que foi observado em todas as treze localidades desse estudo.

Os coeficientes R^2 entre o SPI e AH agrupados por meses iguais são apresentados nas Tabela 16 para as seis localidades base e na 17 para as localidades de Jundiaí, Manduri, Pindorama e Ubatuba.

Tabela 16 – Coeficientes de determinação (R^2) da equação de regressão linear entre SPI e AH agrupados por meses iguais em diferentes escalas de tempo.

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
Jaú	Janeiro	0,77	0,90	0,90	0,95
Jaú	Março	0,62	0,95	0,95	0,95
Jaú	Julho	0,43	0,78	0,91	0,94
Jaú	Outubro	0,57	0,77	0,80	0,95
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
Piracicaba	Janeiro	0,68	0,92	0,88	0,95
Piracicaba	Março	0,76	0,85	0,85	0,95
Piracicaba	Julho	0,70	0,73	0,95	0,96
Piracicaba	Outubro	0,75	0,91	0,93	0,94
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
Tatuí	Janeiro	0,83	0,89	0,92	0,95
Tatuí	Março	0,84	0,90	0,95	0,96
Tatuí	Julho	0,75	0,79	0,93	0,94
Tatuí	Outubro	0,76	0,74	0,88	0,96

Tabela 17 – Coeficientes de determinação (R²) da equação de regressão linear entre SPI e AH agrupados por meses iguais em diferentes escalas de tempo.

Local	Mês	Coeficiente (R ²) de determinação			
		SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12
Jundiaí	Janeiro	0,87	0,94	0,96	0,99
Jundiaí	Março	0,82	0,90	0,94	0,97
Jundiaí	Julho	0,62	0,87	0,95	0,98
Jundiaí	Outubro	0,69	0,81	0,90	0,99
Mandurí	Janeiro	0,91	0,93	0,95	0,98
Mandurí	Março	0,84	0,94	0,96	0,98
Mandurí	Julho	0,72	0,81	0,96	0,98
Mandurí	Outubro	0,69	0,88	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
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

Como primeira análise das Tabelas 16 e 17, nota-se que os menores valores do coeficiente de determinação ocorreram em períodos climatologicamente secos (Julho). Tal fato tem sua explicação na maior variabilidade de condições hídricas que o solo pode apresentar em épocas secas, como exemplifica a Tabela 18, para a região de Campinas, em um Balanço Hídrico com armazenamento máximo de água no solo igual a 100 mm.

Tabela 18 – Condições hídricas estimadas do solo nos anos de 1976 e 1989 (Junho e Julho) na região de Campinas

Ano	Mês					
	Arm de água no solo (mm)		Prec. mensal (mm)		AH (mm)	
	Junho	Julho	Junho	Julho	Junho	Julho
1976	100	100	86	139	36,2	100
1989	31	100	45	139	-3,8	31

Nota-se na Tabela 18, que nos meses de Julho de 1976 e de 1989 foi observado o mesmo valor de precipitação na localidade de Campinas, apresentando assim, esses dois períodos, valores idênticos de SPI mensal. Entretanto, no final do mês de junho de 1976 o solo da região de Campinas apresentava um Arm estimado igual à 100mm. Assim, toda a quantidade de chuva que excedeu a ETP de Julho desse ano gerou excedente hídrico (não houve necessidade de recarga de água no solo), resultando em um AH de 100 mm.

O mês de Junho de 1989 apresentava um armazenamento estimado de apenas 31 mm; assim, a quantidade de precipitação observada em Julho do mesmo ano que ultrapassou a ETP mensal, foi usada para repor a água perdida pelo solo, isto é, para elevar o armazenamento a 100 mm. Apenas após essa etapa é que o excedente hídrico pôde ser gerado, resultando em um valor de AH bastante inferior ao de Julho de 1976, apesar de apresentarem o mesmo valor de SPI mensal. Com isso, 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 como única ferramenta de análise.

Com o aumento da escala de estudo (trimestral, semestral e anual) nota-se uma tendência de aumento na magnitude de (R^2) como pode ser visualizado nas Figuras 9 e 10.

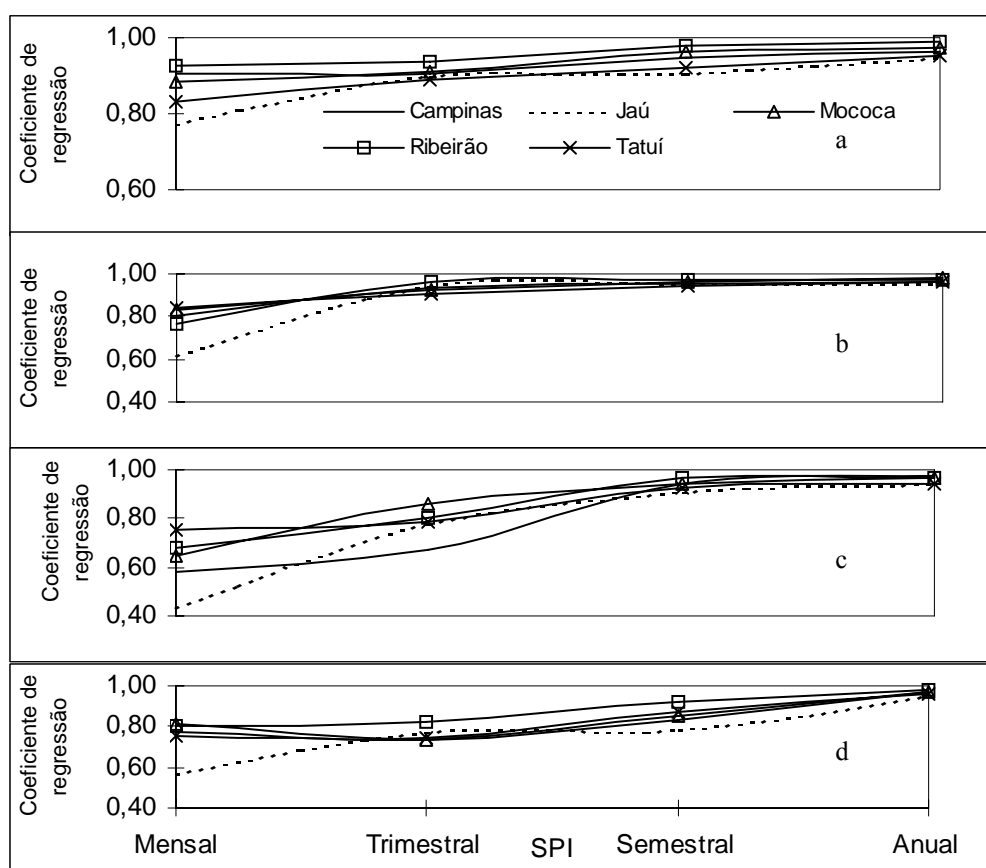


Figura 9 - Variação do coeficiente de determinação R^2 entre o SPI e os respectivos valores de precipitação em relação ao aumento da escala de tempo de estudo para as localidades de Campinas, Jaú, Mococa, Ribeirão Preto e Tatuí nos meses de Março (a) Julho (b), Outubro (c) e Dezembro (d).

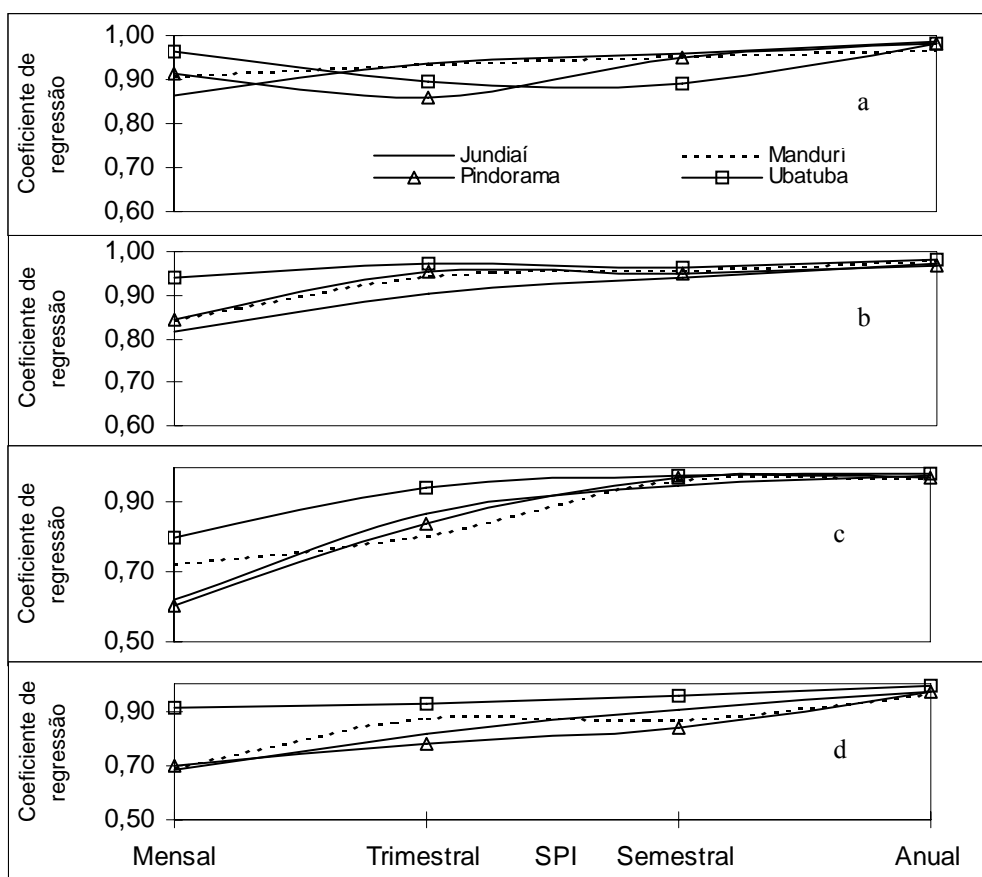


Figura 10 - Variação do coeficiente de determinação R^2 entre o SPI e os respectivos valores de precipitação em relação ao aumento da escala de tempo de estudo para as localidades de Jundiaí, Mandurí, Pindorama e Ubatuba nos meses de Março (a) Julho (b), Outubro (c) e Dezembro (d).

Na escala de tempo trimestral, o distanciamento entre valores do SPI, especialmente em períodos secos, ainda pôde ser notado. Na análise semestral não foi registrado nenhum (R^2) abaixo de 0,80, demonstrando com isso que, a partir dessa escala o SPI pode ser relacionado a um possível excedente ou deficiência hídrica acumulada no período em questão.

A literatura relaciona o estudo da seca hidrológica a longos períodos de análise hídrica (Karl, 1986, BRUNINI et al., 2001 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.

Nas Figuras 11 e 12, o comportamento do SPI mensal e do AH é demonstrado para o período de 1962 a 1964, nas localidades de Campinas, Jaú, Mococa, Monte Alegre do Sul, Pariquera-açu, Pindorama, Piracicaba, Ribeirão Preto, Tatuí e Ubatuba.

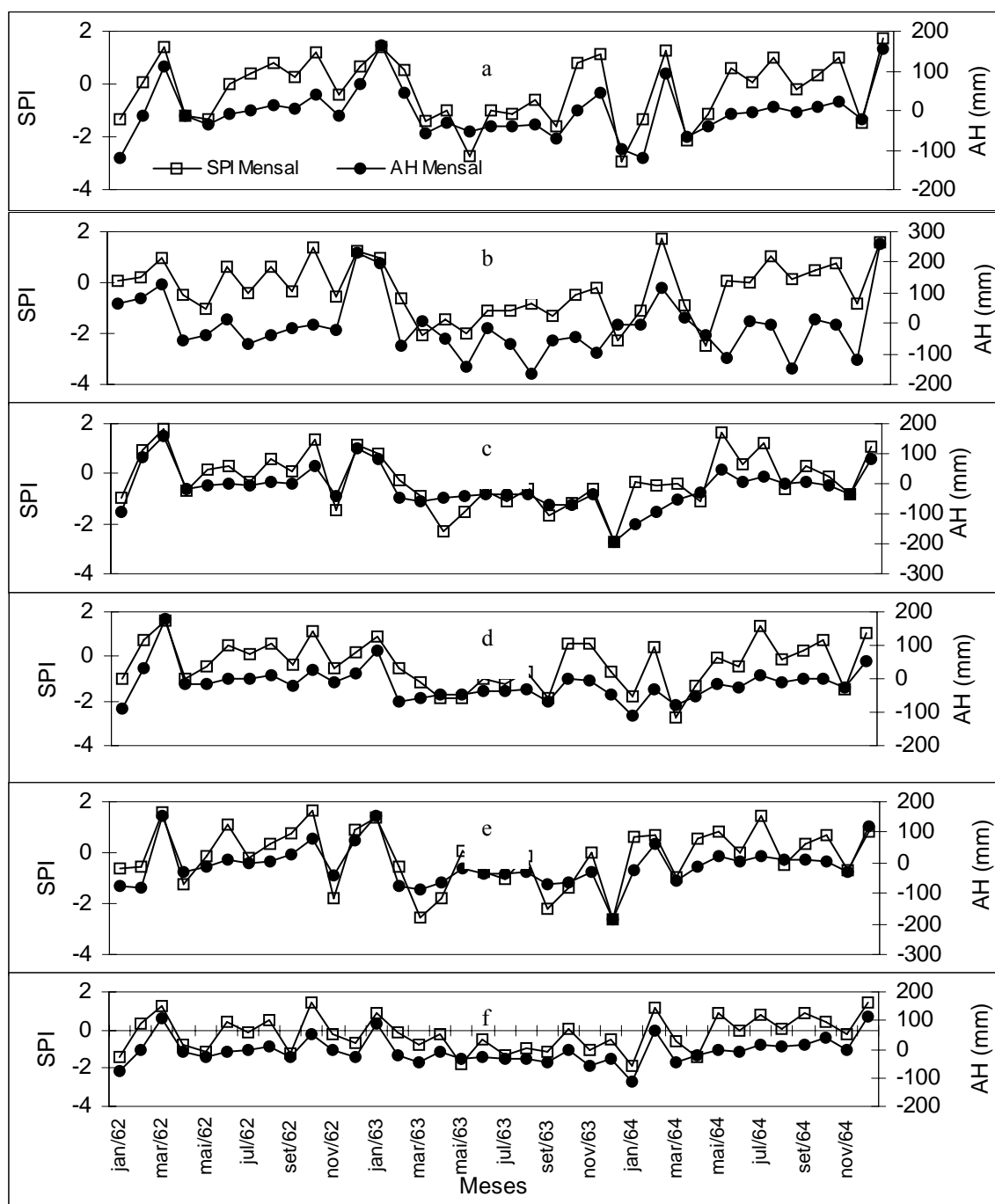


Figura 11 - Comportamento do SPI 1 e do AH para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f).

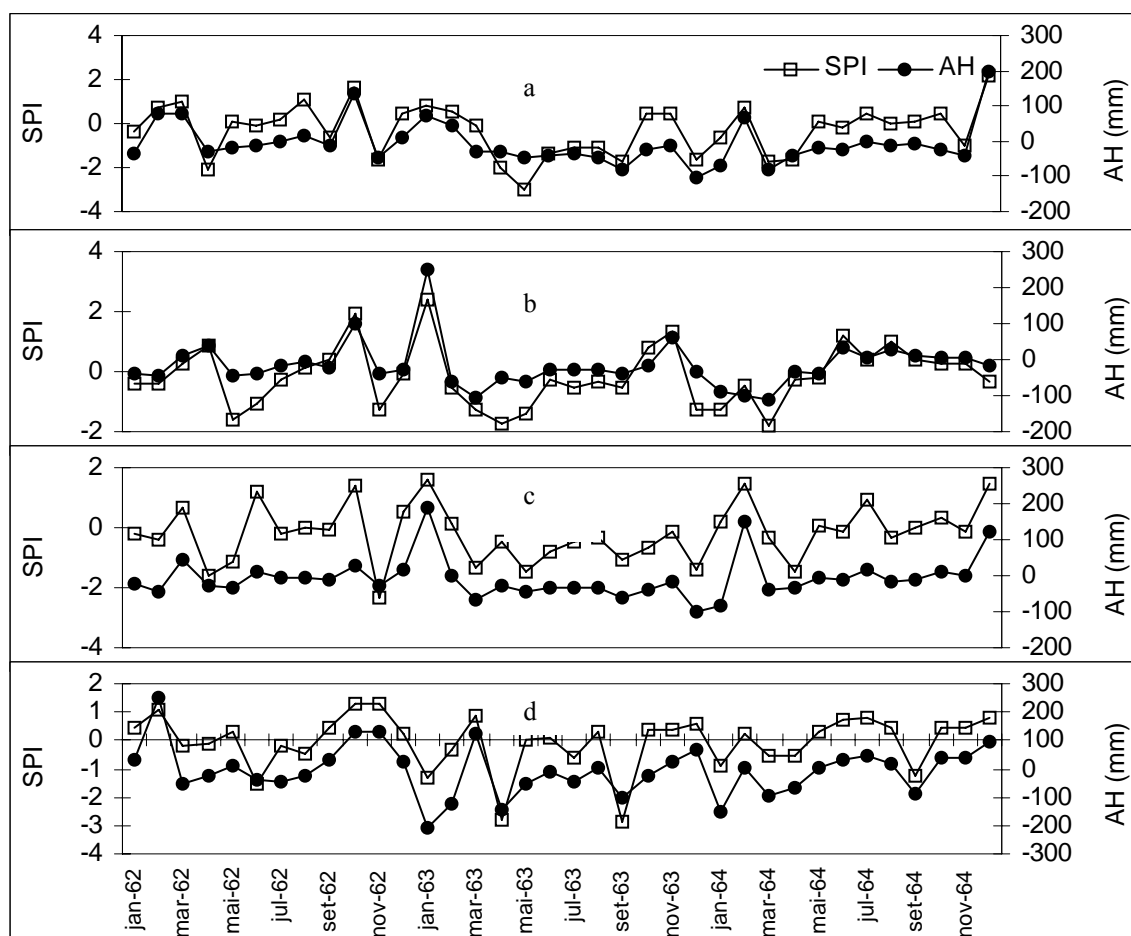


Figura 12 - Comportamento do SPI 1 e do AH para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Monte Alegre Sul (a), Pariqueira-açu (b), Pindorama (c) e Ubatuba.

A exceção das localidades de Tatuí e Monte Alegre do Sul, onde o início da seca foi detectado em Abril de 1963, e da localidade de Ubatuba, onde não houve uma seca estabelecida, todas as demais regiões tiveram o mês de Março de 1963 como data inicial dessa anomalia climática. Tal fato corrobora com Hayes et al. (1999), quando afirmam que um índice padronizado temporalmente e espacialmente deve indicar uma seca extrema em diversas regiões concomitantemente.

O estudo em base anual é demonstrado na Figura 13 para as seis localidades base desse estudo.

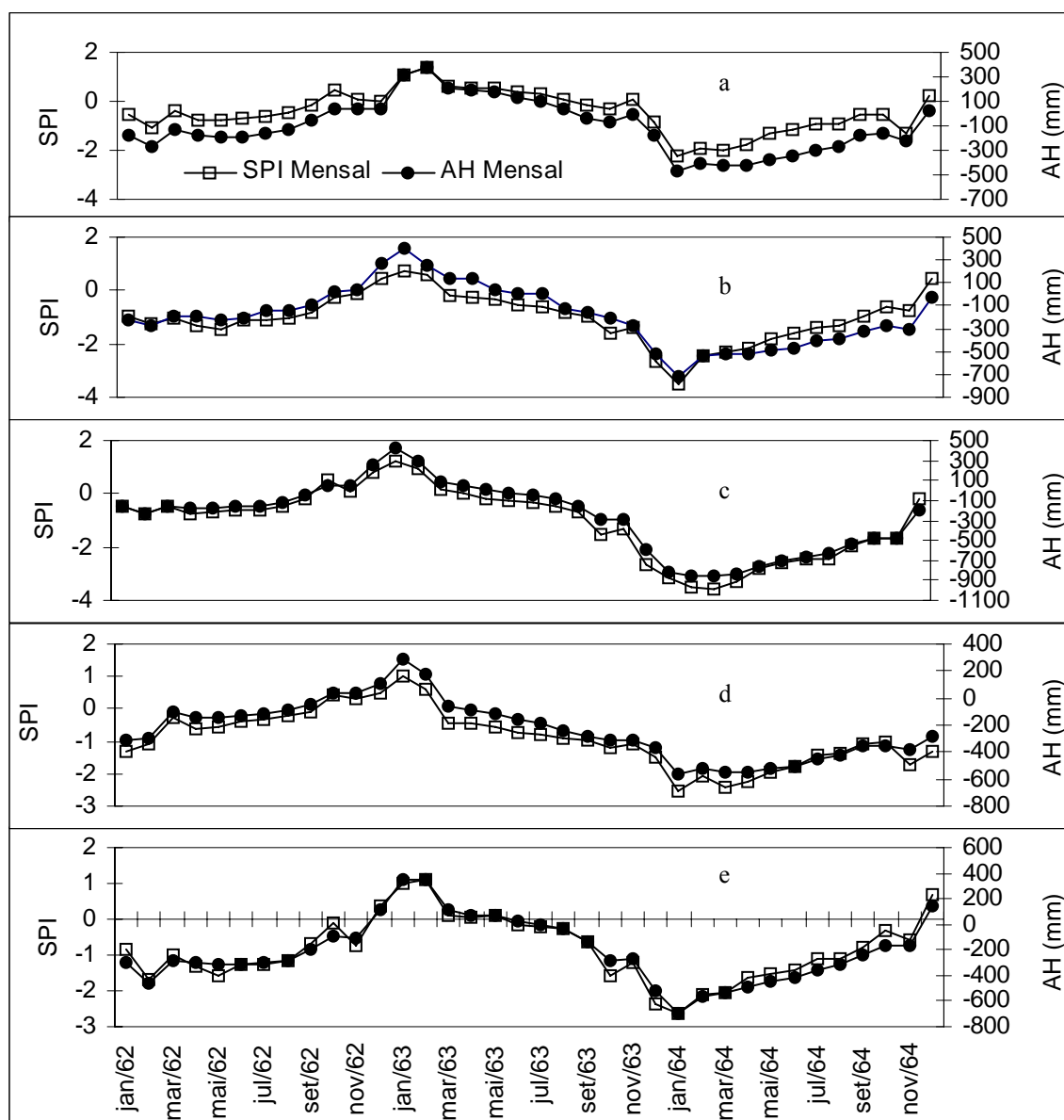


Figura 13 - Comportamento do SPI 12 e do AH acumulado para o período de 1962 a 1964 nas localidades de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f).

Devido à grande concordância entre o comportamento do SPI e de AH, em base anual (confirmado pelos altos valores de R^2 apresentados nas Tabelas 16 e 17), pode-se afirmar que Índice Padronizado de Precipitação está diretamente relacionado, no Estado de São Paulo, ao excedente hídrico estimado em uma região, bacia ou microbacia na escala de tempo acima citada.

A comparação de valores do SPI gerados por diferentes períodos de calibração é apresentada nas Tabela 19, 20 e 21 para Campinas, Mandurí e Pindorama, respectivamente.

Tabela 19 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Campinas por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.

Período de calibração	R²	Inclinação	Intercepto	Willmott
1960 a 2003 e 1890 a 2003	0,98	0,97	-0,002	1,00
1971 a 2003 e 1890 a 2003	0,95	0,96	-0,03	0,99
1971 a 2003 e 1960 a 2003	0,98	0,99	-0,03	1,00

Tabela 20 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Mandurí por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.

Período de calibração	R²	Inclinação	Intercepto	Willmott
1971 a 2003 e 1951 a 1994	0,96	0,95	-0,02	0,99

Tabela 21 – Comparação entre os valores de SPI gerados por diferentes períodos de calibração para a região de Pindorama por meio de análise de regressão linear e pelo índice de concordância de Willmott.

Período de calibração	R²	Inclinação	Intercepto	Willmott
1971 a 2003 e 1951 a 1994	0,96	0,95	-0,05	0,99

A análise das Tabelas 19, 20 e 21 indica que não há mudanças significativas na magnitude do SPI quando são usados diferentes períodos de calibração. Tal característica torna-se importante por permitir a comparação de diferentes locais com diferentes séries históricas.

A frequência de ocorrência das classes de seca, definidas na Tabela 2 pelo SPI é apresentada na Figura 14 para as seis localidades base desse estudo entre 1960 a 2003.

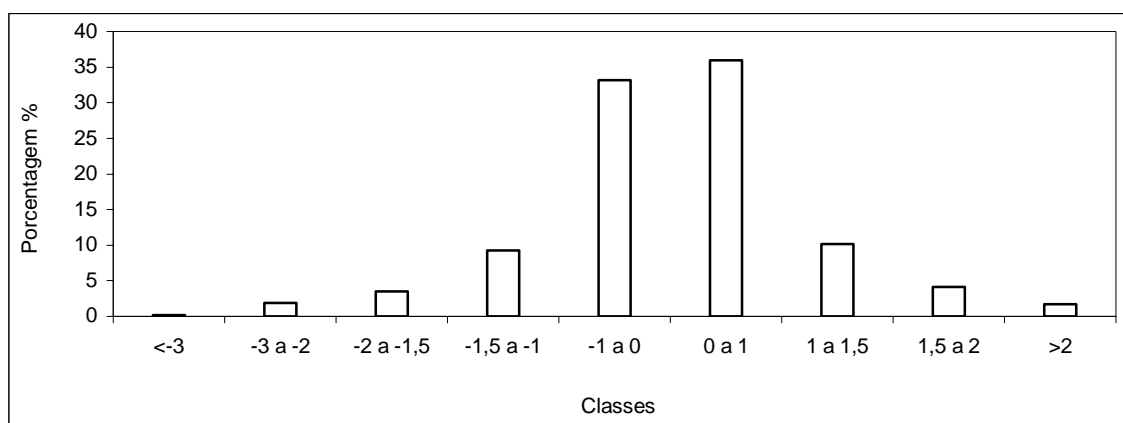


Figura - 14 Frequência de ocorrência das classes de secas definidas pelo SPI nas seis localidades base desse estudo.

Aproximadamente 68% dos valores da SPI situaram-se entre menos um e um e aproximadamente 95% destes entre dois e menos dois. Tais freqüências são explicadas por Hayes et al. (1999), quando afirmam ser o SPI ajustado à distribuição normal, sendo tais freqüências de ocorrência esperadas em qualquer região em que o SPI for aplicado. As treze localidades desse estudo apresentaram freqüências de ocorrência bastante semelhante à Figura 14. Assim, nota-se que o SPI não é capaz de detectar regiões mais sujeitas à seca.

4.5 Comparação Entre o PDSI adap e o SPI

Comparando-se a Tabela 9 com as Tabelas 16 e 17 nota-se, de maneira geral, que o PDSI adap apresentou uma maior concordância com valores de AH do que o SPI mensal. Tal fato, além de estar ligado à pequena memória inerente ao PDSI adap (condições hídricas do mês precedente exercendo influência sobre o atual), é também explicado pelo método do cálculo de **P**, o qual considera fatores do solo, como por exemplo, a recarga potencial.

Se ao final de um mês seco o armazenamento de água do solo não atingir o armazenamento máximo (no caso 100 mm), a PR (recarga potencial) do mês subsequente será maior que zero, aumentando assim a chuva climatologicamente necessária (**P**) do mês subsequente. Por ser comparado, na metodologia do PDSI adap, o valor da chuva observada no mês com o valor de **P**, tal acréscimo pode resultar na diminuição das magnitudes do Índice de Palmer adaptado.

Esse último efeito somado à influência da “pequena” memória inerente ao PDSI adap resultaram em altas correlações dos valores desse índice com AH, mesmo em períodos secos, isto é, meses que apresentam alta variabilidade das condições hídricas do solo.

O estudo da coerência entre o índice Z de anomalia hídrica e o SPI mensal é apresentado na Tabela 22 para as seis localidades base desse estudo em anos secos (1963), úmidos (1982) e para a série histórica de 1960 a 2003 de cada região.

Tabela 22 - Coerência entre o índice Z de anomalia hídrica e o SPI nos 6 locais base desse estudo nos anos de 1963, 1982 e no período entre 1960 e 2003.

Local	Ano	R²	Intercepto	Inclinação
Campinas	1963	0,91	-0,12	0,43
Campinas	1982	0,91	0,16	0,30
Campinas	1960 a 2003	0,90	0,06	0,38
Jaú	1963	0,80	-0,17	0,41
Jaú	1982	0,92	0,18	0,30
Jaú	1960 a 2003	0,88	0,06	0,38
Mococa	1963	0,80	-0,14	0,41
Mococa	1982	0,89	0,20	0,29
Mococa	1960 a 2003	0,86	0,09	0,37
Piracicaba	1963	0,92	0,04	0,47
Piracicaba	1982	0,90	0,15	0,28
Piracicaba	1960 a 2003	0,88	0,06	0,38
Ribeirão	1963	0,86	0,00	0,45
Ribeirão	1982	0,90	0,20	0,30
Ribeirão	1960 a 2003	0,86	0,09	0,38
Tatuí	1963	0,85	-0,07	0,41
Tatuí	1982	0,91	0,13	0,30
Tatuí	1960 a 2003	0,90	0,05	0,38

Para realizar as regressões apresentadas na Tabela 22, os valores do SPI mensal foram inseridos no eixo das ordenadas, enquanto os valores de Z no eixo das abscissas de um plano cartesiano. Em outras palavras, pela equação de regressão, quando Z for igual a zero, o SPI terá o valor do intercepto da mesma.

Em todos os períodos de análise e em todas as localidades, o intercepto manteve-se na categoria próximo à normal do SPI (Tabela 2), demonstrando que, quando a chuva observada for igual a **P**, o SPI mensal indicará condições hídricas normais de uma dada região.

Essas características acima citadas aliadas aos altos valores de R^2 apresentados na Tabela 22, além de indicar grande coerência entre a metodologia dos dois índices de seca, indicam também que apesar de utilizar parâmetros do solo e de temperatura, o elemento de grande importância no cálculo de Z e conseqüentemente do PDSI adap é a precipitação pluviométrica.

O estudo dos coeficientes de inclinação das retas de regressão linear, permite concluir que o índice Z tem um comportamento semelhante ao SPI mensal, independente do local em questão, já que os valores desse foram bastante semelhantes entre as diferentes regiões para um mesmo período de análise. Essa característica é mais um indicativo de que ambos os índices de seca são espacialmente padronizados na Estado de São Paulo.

Por se tratar de um modelo probabilístico, os valores da distribuição gama variam entre 0 e 1, assim, por maior que seja um valor de chuva, a probabilidade cumulativa de ocorrência nunca ultrapassará a unidade. Como o SPI tem como base tal distribuição, altos valores de precipitações (ainda que extremos) não são capazes de gerar valores de SPI que se desviem acentuadamente de uma série histórica.

Esse fato pode ser exemplificado utilizando-se a altura pluviométrica registrada em Maio de 1983 na localidade de Piracicaba (385mm). Nesse mês, a distribuição gama apresentou um valor de probabilidade de ocorrência acumulada de 99,84%, resultando em um SPI de 2,86. Entretanto, igualando essa precipitação à magnitude de 600mm (80% maior do que o registrado) obteve-se uma probabilidade de ocorrência de 99,99% e um SPI de 3,86 (apenas 35% maior do que o gerado pela chuva de 335mm).

É interessante ainda ressaltar que uma altura pluviométrica de 46 mm observada no mês de Maio e na localidade em questão, apresenta uma probabilidade de ocorrência de 49%, enquanto a altura de 83mm (80% maior do que essa última) tem uma probabilidade de 74%. Nota-se, com isso, que o SPI possui um valor limite máximo próximo a quatro, apresentando ainda uma variação cada vez menor para valores extremos de precipitação.

Por se tratar apenas da diferença entre P e a chuva observada multiplicada pelo respectivo fator K de caracterização climática, o índice Z não apresenta o comportamento descrito acima pelo SPI. Tal fato pode ser exemplificado ao se estudar o mês de Maio de 1983 em Piracicaba. Nesse período foi registrado um índice Z de 13,41, entretanto ao igualar a precipitação a 600mm, o índice Z resultante seria de 24,96 (86% superior ao valor de Z gerado pela precipitação de 335mm observado no mês). Nota-se assim um aumento da magnitude do índice Z bastante superior ao aumento da magnitude do SPI para uma mesma variação da altura pluviométrica. Tal característica também torna difícil o estabelecimento de um valor limite máximo para o índice Z .

Essa diferença de comportamento explica a razão de períodos úmidos, onde valores extremos de chuva são registrados, apresentarem os mais baixos coeficientes de inclinação da reta já que alturas pluviométricas extremas diminuem o ângulo de inclinação da mesma (índices Z inseridos no eixo das abscissas).

No caso de períodos secos, tal efeito não é sentido, já que ambos os índices apresentam limites mínimos (chuva observada igual a zero) não registrando, portanto, valores tão extremos do índice Z.

A variação do coeficiente de determinação entre o PDSI, PDSI adap e o SPI em diferentes escalas de tempo é apresentada na Figura 15.

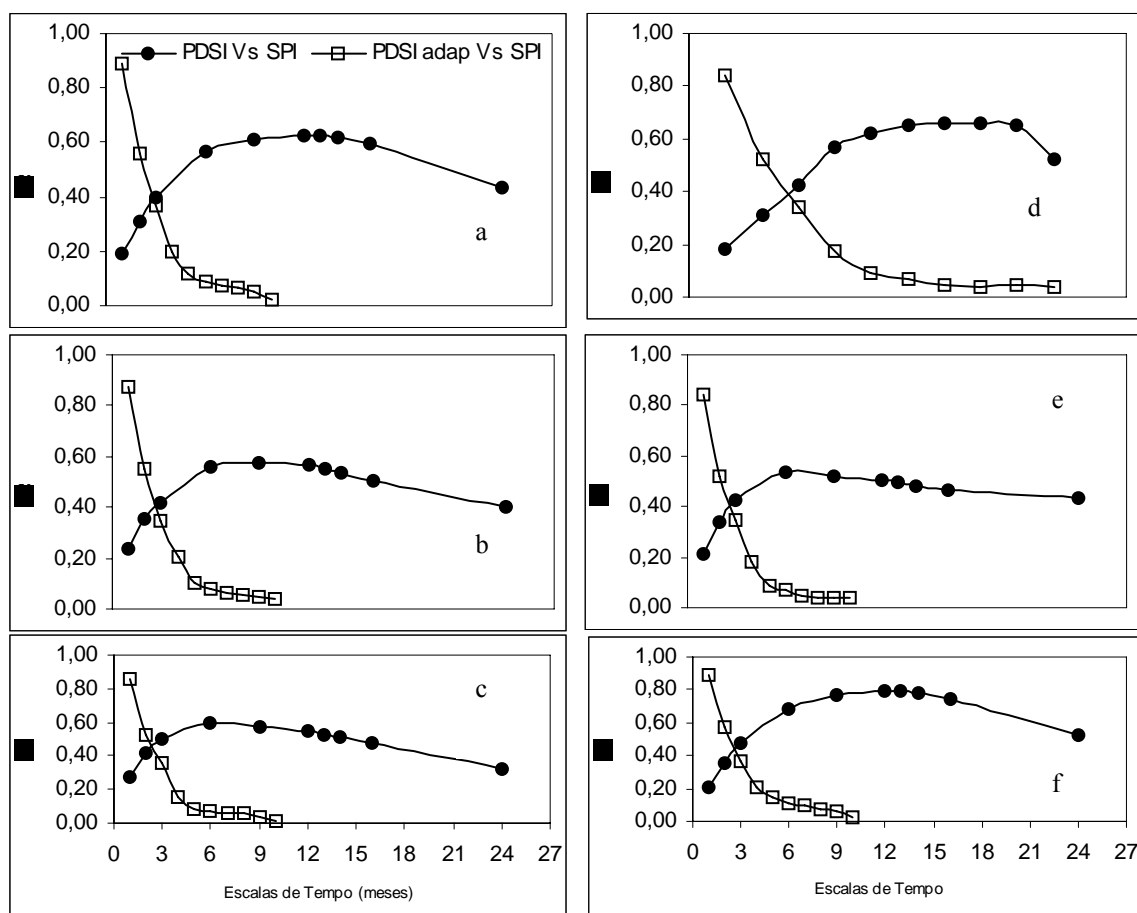


Figura 15 - Variação do coeficiente de determinação entre o PDSI e SPI e entre PDSI adap e SPI em diferentes escalas de tempo para as localidades de Campinas (a), Jaú (b), Mococa (c), Piracicaba (d), Ribeirão Preto (e) e Tatuí (f)

A análise da Figura 15 demonstra a variabilidade espacial da “memória” inerente ao PDSI. Nas localidades de Jaú, Mococa e Ribeirão Preto, esse índice apresentou a maior correlação com valores do SPI semestral, enquanto nas regiões de Campinas, Piracicaba e Tatuí, tal correlação apresentou-se maior em relação aos SPI de dez a catorze meses de escala de tempo. Tal fato pode ser uma das causas que levaram Mackee et al. (1995) e Guttman (1998) a firmarem que nunca se sabe ao certo qual escala de tempo o PDSI considera em sua análise.

Tal variabilidade dificulta a comparação de condições hídricas de diferentes regiões, pois não se pode afirmar que um determinado valor do PDSI em um dado mês na localidade de Ribeirão Preto, por exemplo, (na qual o Índice original de Palmer apresentou uma memória semestral) represente as mesmas condições hídricas que um mesmo valor desse índice representaria, no mesmo mês, na região de Campinas (na qual o PDSI apresentou uma memória anual). Essa característica dificulta o uso do PDSI como ferramenta auxiliar à tomada de decisão na adoção de medidas estaduais de combate à seca.

Por apresentar uma escala de tempo fixa de análise, o PDSI adap apresentou a maior correlação com o SPI na escala mensal, em todas as treze localidades pertencentes ao Instituto Agrônômico (como exemplifica a Figura 15 para as seis localidades base desse estudo), possibilitando a comparação de condições hídricas de diferentes localidades.

4.6 Limitações e Vantagens do SPI e do PDSI adap

A versatilidade apresentada por esse índice (no cálculo do déficit hídrico em diversas escalas de tempo) aliada à afirmação de Hayes et al. (1999), que dizem que o SPI pode ser aplicado a qualquer região que possua uma série histórica de dados mensais de precipitação de no mínimo trinta anos, torna o Índice Padronizado de Precipitação uma valiosa ferramenta para a quantificação da seca meteorológica, hidrológica e até mesmo sócio-econômica (KEYANTASH & DRACUP, 2004).

Tal característica acima citada aliada ao fato de locais que, mesmo com diferentes séries históricas podem ter seus valores de SPI comparados, torna o SPI uma ferramenta de caráter nacional e não apenas estadual.

Por utilizar apenas o elemento meteorológico mais comumente medido no Estado de São Paulo em sua metodologia, o SPI, pode ser aplicado a um número maior de regiões se comparado ao Índice de Palmer, que necessita, além da precipitação, outro elemento meteorológico: a temperatura do ar.

Karl (1986) demonstra grandes alterações na magnitude do PDSI em uma mesma área quando o “período de calibração” é alterado. Essa característica, aliada à arbitrariedade de algumas etapas da metodologia do PDSI e do PDSI adap, como a escolha arbitrária dos períodos mais secos de uma dada série histórica, tornam essas duas ferramentas restritas aos locais onde foram desenvolvidas e testadas, como foi observado por Santos et al. (1987) em relação ao PDSI.

Apesar de apresentar vantagens sobre o PDSI na determinação e na definição do início/fim de uma seca, o PDSI adap ainda utiliza apenas um único valor do índice para quantificar as condições hídricas de uma região, não apresentando, portanto, a versatilidade que o SPI possui.

5 CONCLUSÃO

O ajuste do fator K de caracterização climática e o desenvolvimento de uma nova equação final do índice (baseados em dados meteorológicos do Estado de São Paulo) resultaram em uma nova ferramenta (PDSI adap) padronizada no espaço e no tempo. Em outras palavras, os resultados gerados pelo Índice de Palmer adaptado nas condições climáticas do Estado podem ser comparados em diferentes épocas e em diferentes locais do espaço geográfico para o qual foi desenvolvido.

A semelhança entre o comportamento de AH e do PDSI adap, na escala mensal, demonstra a sensibilidade do novo índice a mudanças no regime de precipitação de uma determinada área. Assim, pode-se afirmar que um possível déficit de precipitação, pode ser detectado rapidamente e ter seu fim indicado de forma abrupta, por meio do uso desse novo quantificador. Tal fato, demonstra que o Índice de Severidade de Seca de Palmer adaptado às condições climáticas do Estado de São Paulo reconhece a seca meteorológica em sua análise.

O PDSI adap apresenta ainda:

- a) Definição de uma escala de tempo única, considerada pelo novo índice (mensal),
- b) O início de uma seca ocorre quando a razão ETR/ETP torna-se inferior ao valor climatologicamente esperado.
- c) O fim dessa anomalia é indicado quando essa mesma relação volta ao patamar climático.

As características acima citadas, aliadas à sensibilidade desse novo quantificador, tornam o PDSI adap uma ferramenta de fácil interpretação de seus resultados e, portanto,

consistente para o monitoramento, próximo ao tempo real, das condições hídricas das diversas regiões do Estado.

O ajuste das séries de precipitação mensal, observadas no Estado de São Paulo, à distribuição Gama e a semelhança entre o comportamento de AH e do SPI em escala mensal (SPI 1) demonstram que o Índice Padronizado de Precipitação é uma ferramenta consistente para o monitoramento, próximo ao tempo real, da seca meteorológica nas diversas regiões do Estado.

A semelhança entre o comportamento do SPI e de AH acumulado nas diversas escalas de tempo desse estudo (1, 3, 6, 9, 12, 24 meses) torna o Índice Padronizado de Precipitação, uma ferramenta indispensável no estudo e monitoramento de diferentes tipos de seca que apresentam respostas lentas a mudanças no regime de precipitação de uma área, como por exemplo a seca hidrológica.

A versatilidade de reconhecer diferentes tipos de seca, como a meteorológica e a hidrológica, possibilita, ao SPI ser também utilizado no estudo da seca sócio-econômica. Devido ao fato dos diferentes tipos de seca serem relacionados entre si, tanto o PDSI adap, quanto o SPI devem ser utilizados em programas estatais, como ferramentas auxiliares na tomada de decisão de medidas de combate aos efeitos, nos diversos segmentos da sociedade (agrícolas, meteorológicos, hidrológicos e até mesmo socioeconômico), do fenômeno natural seca.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M., e STEGUN., I.A: *Handbook of mathematical function*, Dover, pp.1046, 1965.
- 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 METEOROLOGICAL SOCIETY: Meteorological drought – Policy statement. *Bull.Am.Meteorol.Soc.* 78 p.847-849, 1997.
- ARRUDA, H.V. e PINTO, H.S. A simplified gama probability model for analysis ot the frequency distribution of rainfall in the region of Campinas-SP, Brazil. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam v.22. p. 101-108. 1980.
- ASSIS, F. N., ARRUDA, H. V. PEREIRA, A. R. , *Aplicações de estatística `a climatologia*. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, Universitária, 161p. 1996.
- ÁVILA, A. M. H. de. Regime de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul com base em série de longo prazo. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 75p, 1994.
- BRUNINI, O; PINTO, H. S., ZULLO JR, J., BLAIN, G. C., BRUNINI, A. P., ASSAD, E., LOBO, G. A Uso do SPI para Avaliação dos Períodos de Seca no Estado de São Paulo. In: *XII Congresso Brasileiro De Agrometeorologia e III Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia*, Fortaleza. v.1, p. 251-252, 2001.
- 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: *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Anais, Sociedade Brasileira de Meteorologia, Foz do Iguaçu, 2002a.
- BRUNINI, O., BLAIN, G. C., BRUNINI, A. P., SANTOS, R. L.; BRIGANTE, R. S., ALMEIDA, E. L. Monitoramento das Condições de Seca no Estado de São Paulo Utilizando o Índice Padronizado de Precipitação- SPI. In: *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Anais, Sociedade Brasileira de Meteorologia, Foz do Iguaçu, 2002b.
- CAMPOS. H. *Estatística experimental não paramétrica*. Piracicaba , ESALQ, 343 p. 1979.
- CAMARGO A. P., Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Bragantia*. Campinas. v.21 n.12. p. 163-213. 1962.
- CUNHA,A.R., MARTINS, D., PASSOS, J.R.S: O modelo gama de probabilidade aplicado ao estudo da distribuição da chuva mensal a região administrativa de Bauru-SP In :*X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, Anais, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Piracicaba, p. 107-109,1997.
- DRACUP, J.A.; LEE,K.S. e PAULSON, G. On the definatins of droughts. *Water Resurces Research*, Washington, v.16, n.2. p.297 – 302, 1980.
- DALE, R. F. *Applied Climatology*. West Laffayte, Indiana: Purdue University , USA, 125p. 1968.

EDER, K. B. and DAVIS, M.J. Spatial and temporal analysis of the Palmer Drought Severity Index over the south-eastern United States. *Journal of Climatology*, Asheville, v. 7,n.1 p. 31-56, 1987.

FRIEDMAN, D.G. The prediction of long-continuing drought in the south and southwest Texas. *Occasional Papers in Meteorology* , nº1. The Travelers Weather Research Center, Hartford, CT, 182 p. 1957.

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. e VANYARKHO, O.V. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull.Am.Meteorol.So.* 80(3): p.429-438, 1999.

HEDDINGHAUS, T. R. e SABAL, P. A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here?. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 7.,1991, Boston. Anais American Meteorological Society , Boston: PREPRINTS, 1991. p.242 – 246.

HEIM JUNIOR, R. R, A review of twentieth - century drought indices used in the United States. *Bull.Am.Meteorol.So.* 83(8): p.1149-1163, 2002.

KARL, T. e KOSCIENLNY, A.J. Drought in the United States: 1895-1981. *Journal of Climatology*, Asheville, v. 2, p. 313-329, 1982.

KARL, T. Same spatial characteristic of drought duration in the United States. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Boston, v.22, p. 1356-1366, 1983.

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. *Bull.Am.Meteorol.So.* 83(8): p.1167-1180, 2002.

MCKEE,T.B.; DOESKEN, N.J. e KLEIST,J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 8.,1993, Boston. Anais American Meteorological Society , Boston: PREPRINTS, 1993. p.179 – 184.

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J. e KLEIST,J. Drought monitoring with multiple times scales. In: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, 9.,1995, Boston. Anais American Meteorological Society , Boston: PREPRINTS, 1995. p.233 – 236.

MORAES, J.C. e SANTOS, J.M. Considerações sobre o Índice de Severidade de Seca de Palmer. In: *IV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Anais, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Londrina, p. 151-157,1986.

MORAIS, A.R., BOTELHO, A.V.A., CARVALHO, L.G., MUNIZ, J.A., LGE, G. Estimativa da precipitação provável em Lavras (MG) através da distribuição gama. *Rev Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.9, n 2. p.305-310, 2001.

OLAPIDO, E.O. A comparative performance analysis of three meteorological drought indexes. *Journal of Climatology*, Chichester, v.5, p. 655 – 664, 1985.

PALMER, W.C. Meteorological drought. *US Weather Bureau Res. N° 45* . Washington, 58p, 1965.

PALMER, W.C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new Crop Moisture Index, *Weatherwise*, 21, p.156-161, 1968.

RAO, A.R. e PADMANABHAN, G. Analysis and modeling of Palmer's drought index series, *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.68 (1-4), p.211-229, 1984.

RASMUSSEN, E.M., DICKINSON, R.E., KUTZBACH, J.E., CLEAVELAND, M.K. *Climatology*. In: MAIDMENT, D.R. *Handbook of hydrology*. McGRAW-HILL, 1993, 2.1 – 2.44

SANSIGOLO, C.A. Análise comparativa do desempenho dos Índices de Seca de Palmer (PDSI) e da Precipitação Normalizada (SPI) em Piracicaba, SP (1917 – 2001). *Revista Brasileira De Meteorologia*, Brasília, v.19,n.1, p. 51-56, 2004.

SANTOS, J. M., MORAES, J.C. e PAIÃO, L.B.F. O índice de aridez de Palmer: uma análise crítica. In: *V congresso brasileiro de agrometeorologia*. Anais, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Belém, p. 296-301, 1987.

SANTOS, R. M. N. e 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.

SANTOS, F.A.S. & ANJOS, R.J. Utilização do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) no monitoramento da seca no Estado de Pernambuco. In: *XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Anais, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Fortaleza, p. 121-122, 2001.

THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. *Climatology*, Centerton, v.8, n.1, p.1 – 40, 1955.

THOM, H. C. S. *Some methods of climatological analyses* . World Meteorological Organization, Geneva, 53p, 1966. (WMO, 199; TP, 103; Technical note. ,81.)

WELLS, N. GODDARD, S. HAYES M. J. A self calibration Palmer Drought Index. *Journal of Climatology* V 17. n.12. p. 2335-2351. 2004.

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*. WESTVIEW, 1987. p. 11-14.

WILHITE, D. A., Drought as a natural hazard: Conceptions and definitions. In: WILHITE, D. A. *Drought : A global assessment*. Routledge, 2000. p. 111 – 120.

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*. WMO Tech. Note 138, Publ. WMO-392, Geneva, Switzerland,127p. 1975

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *International Meteorological Vocabulary*. 2d, WMO No 182, WMO, 784p. 1992

APENDICE A - USO DO PDSI , DO PDSI adap E DO SPI NO MONITORAMENTO HÍDRICO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Baseado em dados meteorológicos coletados diariamente de aproximadamente 130 localidades do Estado de São Paulo, o Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), pertencente ao Instituto Agrônomo, vem utilizando, em caráter experimental, o PDSI adap como ferramenta de monitoramento climático das condições hídricas das diversas regiões do Estado. Nas Figuras 16 e 17 são apresentados exemplos do uso, proposto pelo CIIAGRO, do PDSI e do PDSI adap, respectivamente.

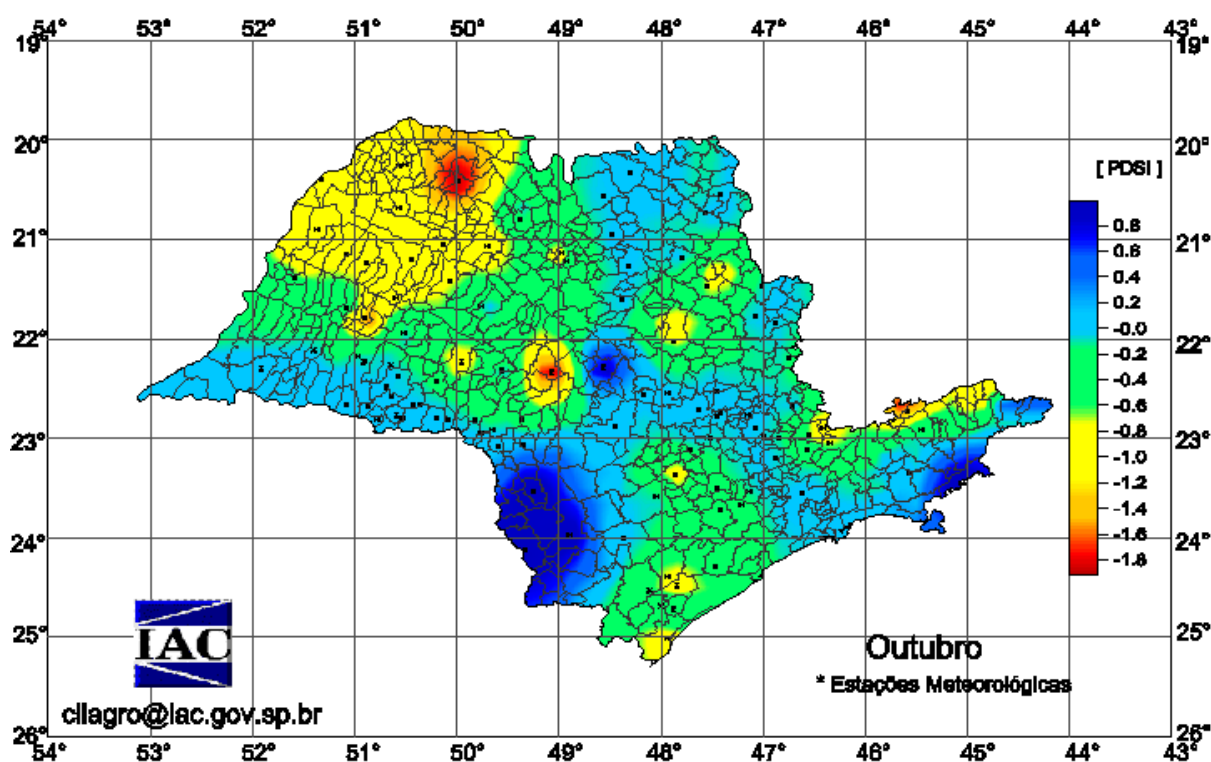


Figura 16- Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do PDSI
– Outubro de 2004

Analisando-se a Figura 16, nota-se que o PDSI indicava condições de seca na região Noroeste do Estado de São Paulo (valores abaixo de -1). Entretanto, a Tabela 23

indica que, a exceção da localidade de José Bonifácio, a região em questão apresentou totais de precipitação pluvial próximos aos valores climatologicamente esperados.

Tabela 23 – Precipitação observada, precipitação média e anomalia para a região noroeste do Estado de São Paulo – Outubro de 2004.

Local	Precipitação Observada no mês(mm)	Média Mensal (mm)	Anomalia (mm)
Adamantina	142	150	-8
Andradina	167	124	43
Araçatuba	95	118	-23
Auriflama	187	115	72
Buritama	173	88,5	84,5
Ilha Solteira	159	116	43
Jales	131	104	27
JoséBonifácio	73	118	-45
Monte Aprazível	83	72,5	10,5
Pres.Prudente	181	143	38
Rio Preto	95	105	-10
Votuporanga	95	123	-28

Tal contradição, entre as magnitudes mensais de chuva e a metodologia original do Índice de Severidade de Seca de Palmer, é devida a resposta lenta que tal método apresenta a mudanças no regime de precipitação pluvial de uma área. Por meio da Figura 17, nota-se que o PDSI adap, não apresenta tal contradição.

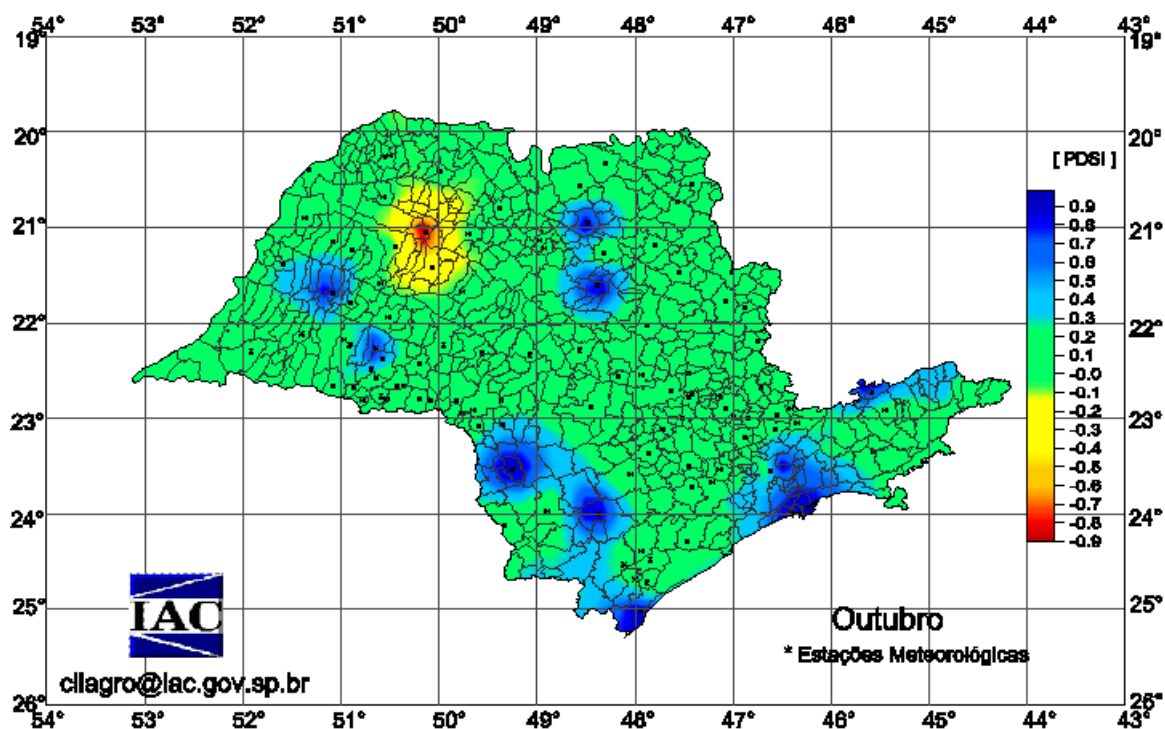


Figura 17-Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do PDSI adap – Outubro de 2004

A sensibilidade apresentada pelo novo Índice a mudanças no regime de chuva de uma região, associada à semelhança entre valores do Índice de Severidade de Seca de Palmer adaptado às condições climáticas do Estado de São Paulo, apresentadas na Figura 17, e os do SPI, apresentadas na Figura 18, demonstram que o PDSI adap é uma melhor ferramenta para o monitoramento das condições climáticas do Estado quando comparada ao PDSI.

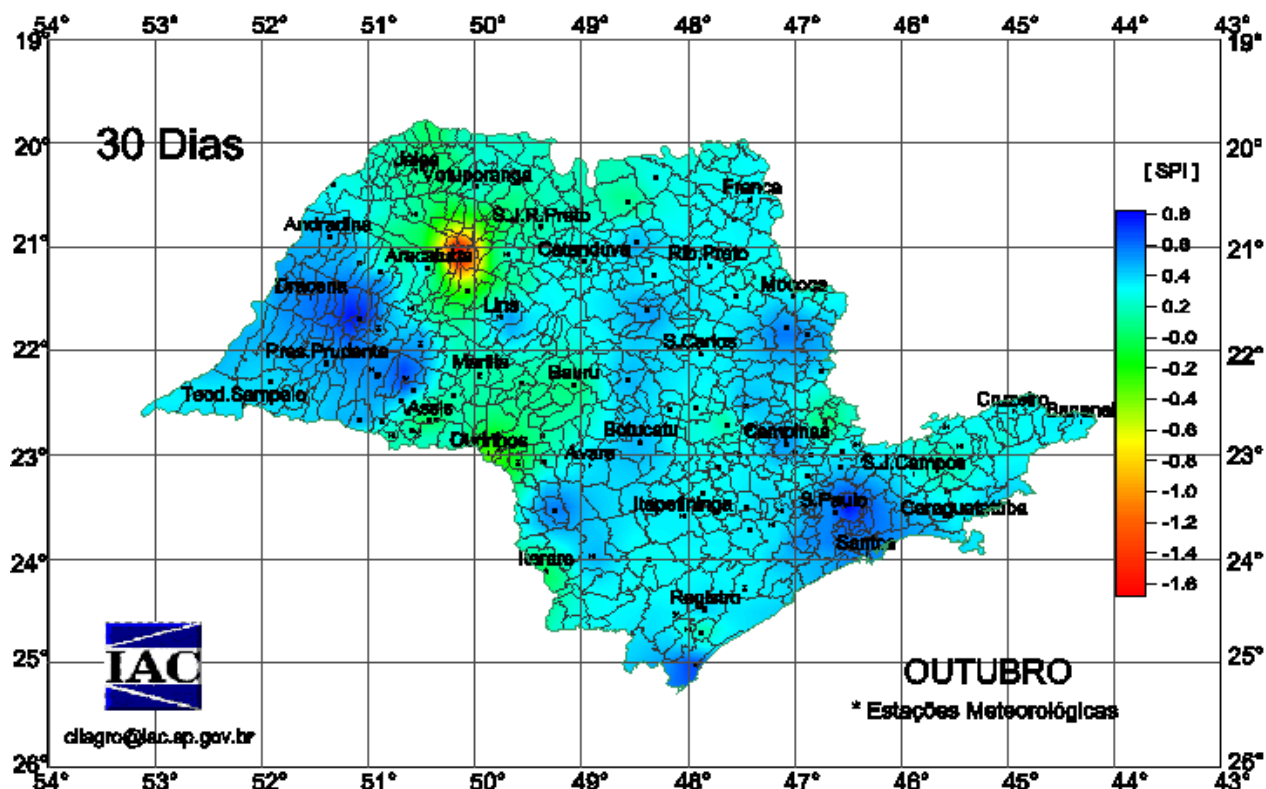


Figura 18- Monitoramento das condições hídricas do Estado de São Paulo, por meio do SPI 1 – Outubro de 2004

A definição da escala temporal de análise do PDSI adap (mensal) e o estabelecimento do valor limite entre o fim e o início de uma seca (-0,5), baseado em parâmetros do Balanço Hídrico Climático, são outras características que tornam o PDSI adap um índice consistente para o monitoramento das condições climáticas do Estado de São Paulo, pois, por meio deste, sabe-se que a região de José Bonifácio (ver Figura 17) apresentou, no mês Outubro de 2004, uma relação ETR/ETP abaixo da climatologicamente esperada.

Tal conclusão não pode ser observada na Figura 16, já que o Índice original de Palmer não apresenta uma escala temporal de análise definida e o início ou o fim de uma seca não está relacionado a nenhum parâmetro do Balanço Hídrico Climatológico. Espera-se, portanto, que o PDSI adap substitua o PDSI como ferramenta de monitoramento climático das condições hídricas das diversas regiões do Estado de São Paulo.