

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS ÍNDICES DE SECA DE PALMER (PDSI) E DA PRECIPITAÇÃO NORMALIZADA (SPI) EM PIRACICABA, SP (1917-2001)

CLÓVIS ANGELI SANSIGOLO
LMO, CPTEC, INPE, São José dos Campos, SP
E-mail : sansigol@cptec.inpe.br

Recebido Janeiro 2003 - Aceito Dezembro 2003

RESUMO

Séries históricas do Índice de Severidade de Secas de Palmer (PDSI) em Piracicaba, SP (1917-2001) são comparadas com as correspondentes do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) usando análise espectral. O PDSI apresentou 8 periodicidades significativas, explicando ~57% da variância total, enquanto os vários SPI (1-60 meses) não apresentaram nenhuma periodicidade significativa. O PDSI e o SPI são linearmente correlacionados (coerências²>0,8), mas sistematicamente defasados de -1 radiano. São apresentadas as características, definidas por ambos índices, dos principais eventos secos e chuvosos na região.

Palavras-chave: Secas, PDSI, SPI, espectros

ABSTRACT: COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF THE PALMER DROUGHT SEVERITY INDEX (PDSI) AND THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI) IN PIRACICABA, SÃO PAULO, BRAZIL (1917-2001)

This study compares historical series (1917-2001) of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) in Piracicaba, São Paulo, Brazil, with time series of corresponding Standardized Precipitation Index (SPI) through spectral analysis. The PDSI presented 8 significant periodicities, explaining ~57% of the total variance, while the various SPIs (1-60 months) did not presented significant periodicities. The PDSI and the SPIs are linearly related (coherencies²>0.8), but systematically lagged by -1 radian. The characteristics of the main wet and dry events in the region, defined by both indices, are presented.

Key words: Drought, PDSI, SPI, spectra

1. INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno climático regional causado pelo déficit de precipitação em relação à evapotranspiração potencial. É uma situação temporária, com duração, magnitude e severidade (Byun & Wilhite, 1991), além de extensão (Karl, 1983; Gutman, 1998), diferente de aridez, que é uma característica climática permanente. Um dos maiores problemas associados à seca é sua definição, que geralmente depende do tipo especial de aplicação. Comumente, quatro definições, baseadas em considerações meteorológicas, hidrológicas, agrícolas e econômicas têm sido adotadas: seca meteorológica refere-se a precipitações abaixo das normais esperadas; secas hidrológica e agrícola correspondem aos dois principais usos da água e referem-se, respectivamente, a níveis de rios e reservatórios abaixo dos normais e umidade do solo insuficiente para suprir a demanda das plantas e seca econômica tem uma definição mais ampla, em função do suprimento e da demanda de água, isto é, o déficit de água induzindo a falta de produtos (energia elétrica, alimentos, etc), devido ao volume inadequado, ou má distribuição das chuvas, aumento no consumo e até mau gerenciamento dos recursos hídricos (Dracup et al, 1980a,b; Olapido, 1985).

Palmer (1965) propôs um índice de severidade de secas (PDSI) que satisfizesse as necessidades hidrológicas e agrícolas. O PDSI vem sendo usado com sucesso há mais de 30 anos para monitorar secas, nos Estados Unidos (Hayes et al., 1999). Suas principais suposições, relacionadas ao cálculo dos componentes do balanço hídrico e à natureza empírica dos coeficientes de padronização, foram extensivamente discutidas por Alley (1984) e Karl (1986), que concluíram que o PSDI, se apropriadamente utilizado, é uma ferramenta útil para a pesquisa e monitoramento de secas em tempo real.

McKee et al. (1993) propuseram um novo índice, o SPI (Índice de Precipitação Normalizada), para quantificar o déficit de precipitação nas diversas escalas de tempo. Segundo esses autores, o SPI teria uma maior capacidade de detecção e monitoramento da seca, além de contornar algumas limitações do PDSI. Fisicamente, o SPI, para um dado período de tempo é a diferença entre a precipitação observada e a média dividida pelo desvio padrão. O SPI tem-se mostrado bastante útil no monitoramento de secas nos EUA, principalmente pela sua flexibilidade, simplicidade de cálculo e interpretação (Hayes et al., 1999).

O interesse na utilização desses dois índices no monitoramento de secas é relativamente recente no Brasil,

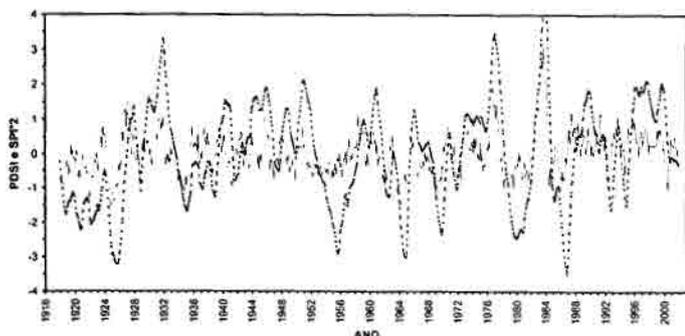


Figura 1: Séries temporais das médias móveis anuais dos índices PDSI (linha tracejada) e SPI1 (linha contínua) para Piracicaba, no período de 1917 a 2001.

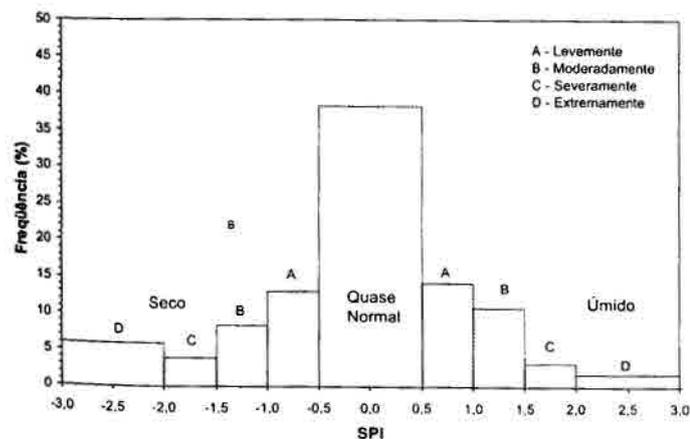
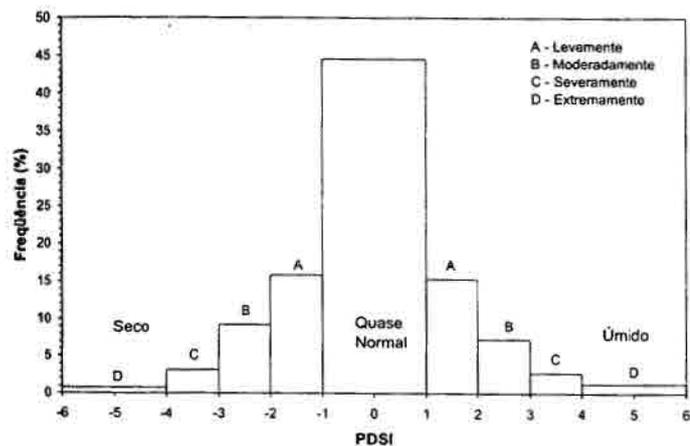


Figura 2: Distribuições de frequência para as 9 categorias dos índices PDSI e SPI 1 em Piracicaba.

Na Tabela 1 encontram-se algumas características (início, fim, duração e índice médio) dos principais eventos moderadamente secos e chuvosos, com duração igual ou superior a 6 meses, obtidos em Piracicaba pelos índices PDSI e SPI6, entre 1917 e 2001. Nos 85 anos de registros, ocorreram, segundo o PDSI, 8 eventos secos e 8 chuvosos. A maior seqüência seca observada foi de 23 meses e quase todas os eventos foram na média moderados ($PDSI > -3$), mas com alguns meses severamente secos. A maior seqüência chuvosa foi de 18 meses e quase todos os eventos foram moderados ($PDSI < 3$), exceto o de outubro de 1982 a junho de 1984, ocasião do forte El Niño de 1982/83. Pelo SPI definiram-se, no período analisado, 7 eventos moderados de seca ($SPI > -1,5$), exceto o que ocorreu entre setembro de 83 e fevereiro de 84, que foi de extrema intensidade ($SPI < -2$). A mais longa seca durou 17 meses e ocorreu entre novembro de 1962 e março de 1964. Dez eventos chuvosos ocorreram no mesmo período e a maioria foi de severa intensidade ($SPI > 1,5$). O de maior duração (23 meses) e intensidade média (2,1) ocorreu entre agosto de 1981 e fevereiro de 1983, ocasião do El Niño 82/83. O SPI6 foi aqui usado pois só após 6 meses se definem bem as seqüências secas/chuvosas contínuas.

Verifica-se que o comportamento destes dois índices na definição das características dos eventos é bem distinto, pois eles têm fundamentos físicos diferentes, o PDSI, além das precipitações, inclui os balanços hídricos no solo.

Seqüências Secas pelo PDSI				Seqüências Chuvosas pelo PDSI			
Início	Fim	Duração (meses)	PDSI Médio	Início	Fim	Duração (meses)	PDSI Médio
Dez 1917	Jun 1918	7	-2,2	Jan 1929	Jun 1929	6	2,5
Dez 1919	Ago 1920	9	-2,6	Dez 1930	Jan 1932	14	3,1
Dez 1923	Out 1925	23	-3,0	Fev 1950	Jul 1950	6	2,6
Out 1954	Ago 1955	11	-3,1	Jan 1960	Jul 1960	7	2,5
Set 1963	Nov 1964	14	-2,8	Dez 1975	Mai 1977	18	3,1
Jan 1969	Out 1969	10	-2,5	Out 1982	Jun 1984	16	4,1
Dez 1978	Out 1980	23	-2,4	Out 1996	Jun 1997	9	2,3
Out 1985	Dez 1986	15	-3,2	Jan 1999	Jul 1999	7	2,6
Seqüências Secas pelo SPI6				Seqüências Chuvosas pelo SPI6			
Início	Fim	Duração (meses)	SPI Médio	Início	Fim	Duração (meses)	SPI Médio
Nov 1920	Jul 1921	9	-1,4	Ago 1928	Jan 1929	6	1,6
Fev 1924	Fev 1925	13	-1,4	Jul 1930	Fev 1931	8	1,7
Ago 1955	Jan 1956	6	-1,4	Dez 1957	Mai 1958	6	1,3
Nov 1962	Mar 1964	17	-1,4	Ago 1959	Jan 1960	6	1,4
Nov 1967	Fev 1969	16	-1,1	Jul 1975	Ago 1976	14	1,7
Jul 1978	Fev 1979	8	-1,5	Ago 1981	Jun 1983	23	2,1
Set 1983	Fev 1984	6	-2,1	Dez 1986	Mai 1987	6	1,4
				Out 1990	Mar 1991	6	1,7
				Set 1994	Fev 1995	6	1,8
				Ago 1998	Jan 1999	6	

Tabela 1: Características dos principais eventos moderadamente secos e chuvosos, obtidas pelos índices PDSI e SPI, em Piracicaba (1917-2001).

principalmente em relação ao SPI. Santos et al. (1987) fizeram uma análise crítica do PDSI em Piracicaba, SP. Lima et al. (1989) utilizaram o PDSI e outros índices para estudar as secas em Alagoas e Azevedo & Silva (1994) compararam o PDSI com outros índices, na microregião do agreste da Borborema, na Paraíba. Brunini et al. (2001), Lobo (2001) e Santos & Anjos (2001) utilizaram o SPI o monitorar secas nos Estados de São Paulo e Pernambuco, respectivamente.

O objetivo deste trabalho é uma análise comparativa das principais características espectrais simples e cruzadas dos índices de seca PDSI e SPI em Piracicaba, SP, no período de 1917 a 2001. Visa-se também, por meio de uma climatologia desses índices, a obtenção das características dos principais eventos secos e chuvosos no período considerado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas as séries históricas mensais de 1917 a 2001 dos totais de precipitação pluviométrica e de temperatura média do ar em Piracicaba, SP (Lat = -22°42', Lon = -47°38' e Alt. = 546m). Balanços hídricos sequenciais mensais, pelo método de Thornthwaite & Matter (1955), adotando uma capacidade de armazenamento de água no solo de 100mm, foram usados para obter os diversos parâmetros usados no PSDI, que foi definido por Palmer (1965) como:

$$PDSI_i = 0,897 PDSI_{i-1} + (Z_i/3) \quad (1)$$

na qual i é o mês de interesse e Z um índice de anomalia de umidade, dado por:

$$Z_i = (P_i - \bar{P}) K_i \quad (2)$$

na qual P é a precipitação observada, \bar{P} a precipitação climatologicamente apropriada para as condições existentes e K uma constante de padronização. \bar{P}_i pode ser obtido por:

$$P_i = \alpha_i ETP_i + \beta_i PR_i + \gamma_i PRO_i - \delta_i PL_i \quad (3)$$

na qual ETP é a evapotranspiração potencial, PR a recarga potencial de umidade do solo, PRO o escoamento superficial potencial e PL a perda potencial de umidade do solo. Os parâmetros α , β , γ e δ são definidos mensalmente, num período de calibração, por:

$$\alpha = \overline{ETR} / \overline{ETP} \quad (4)$$

$$\beta = \bar{R} / \overline{PR} \quad (5)$$

$$\gamma = \overline{RO} / \overline{PRO} \quad (6)$$

$$\delta = \bar{L} / \overline{PL} \quad (7)$$

na qual ETR é a evapotranspiração real, R a recarga, RO o escoamento superficial e L a perda de umidade do solo.

As constantes de padronização K_i também são

mensalmente definidas, num período de calibração, por:

$$K_i = 17,67 \hat{K}_i / \sum_{j=1}^{12} |P_j - \bar{P}_j| K_j \quad (8)$$

na qual \hat{K}_i é dado por :

$$\hat{K}_i = 1,5 \log_{10} [(T_i + 2,8) / |P_i - \bar{P}_i|] + 0,5 \quad (9)$$

e T , a razão entre a demanda e o suprimento de umidade, por:

$$T_i = (\overline{ETR}_i + \bar{R}_i + \overline{RO}_i) / (\bar{P}_i + \bar{L}_i) \quad (10)$$

O SPI é determinado a partir das funções de densidade de probabilidade que descrevem as séries históricas de precipitação nas diferentes escalas de tempo utilizadas (1-60 meses). Foram consideradas, para fins de ajuste, as distribuições normal e gama2. Conhecida (ajustada) a função de distribuição de probabilidade acumulada, a chance de uma dada quantidade de precipitação observada é obtida e o SPI é computado usando a distribuição inversa (Mc Kee et al., 1995). No caso das precipitações acumuladas num dado intervalo de tempo (1, 3, 6, ...60 meses) terem uma distribuição normal, o SPI é simplesmente a variável reduzida da distribuição normal z_i :

$$SPI = z_i = (P_i - \bar{P}) / \sigma_i \quad (11)$$

na qual P_i é a precipitação observada e \bar{P}_i e σ_i , respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada.

Análises espectrais simples dos dois índices, usando transformadas rápidas de Fourier (FFT), foram utilizadas para identificar possíveis periodicidades, que serão verificadas pelo teste de Fisher estendido (Shimshoni, 1971). Análises espectrais cruzadas entre o PDSI e os SPI de 1, 3, 6, 12, 18, 24, 36 e 60 meses foram utilizadas para verificação de possíveis correlações significativas (coerências) e ângulos de fase nas diferentes frequências ou períodos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 encontram-se as séries temporais dos índices PDSI e SPI1 para Piracicaba, SP, no período de 1917 a 2001. Note-se uma boa concordância entre as séries das médias móveis anuais desses índices, que foram usadas nessa figura para suavização, além de melhor visualização dos mesmos.

Os histogramas com as distribuições de frequência dos índices PDSI e SPI 1 nas 9 categorias consideradas são mostrados na Figura 2. Como é suposta uma distribuição normal para os dois índices, o PSDI é mais simétrico que o SPI 1. Ressalte-se que ambos índices propostos para monitorar secas também podem ser usados para monitorar eventos chuvosos.

Na Figura 6 encontram-se as coerências quadráticas entre o PDSI e os SPIs para diferentes períodos entre 1 e 60 meses. Para períodos superiores a 24 meses observam-se altos coeficientes de determinação (r^2), da ordem de 0,8, mas pequenas flutuações em r^2 ocorrem nos períodos inferiores. Verifica-se que rapidamente (menos de 6 meses) os SPIs 1 e 3 se defasam de -1 radiano e permanecem sistematicamente defasados com este mesmo ângulo ($\sim 57^\circ$). A mesma defasagem (-1 rad) é observada nos SPI 6 – 60, com leve tendência de diminuição em longos períodos.

Como o PDSI apresentou um conjunto de 8 periodicidades significativas, que explicam $\sim 57\%$ da variância total, construiu-se um modelo de previsão baseado nas mesmas:

$$PDSI_i = \overline{PDSI} + \sum_{j=1}^8 a_j \cos(2\pi T_j / n) + b_j \sin(2\pi T_j / n) \quad (12)$$

Na qual $i = 1, 2, 3 \dots$ para os anos de 1917, 18, 19 ..., $n = 85$ anos, T_j as 8 periodicidades significativas (7,7; 17; 14,2; 5,7; 8,5; 6,6; 21,3 e 42,5 anos), a_j os coeficientes dos cossenos (0,0587; 0,2007; 0,2965; -0,6434; 1,6694; -0,3372; 0,0543;

$-0,0993$) e b_j os coeficientes dos senos (0,3325; 0,1938; 0,2565; -1,2201; -0,2251; -0,0845; -0,2965; -404,7).

Na Figura 7, encontram-se os PDSI médios anuais observados (1917-2001) e os ajustados (1917-2010). Verifica-se nessa figura que o modelo ajustado define razoavelmente bem as seqüências secas e chuvosas, mas não tão bem as intensidades, principalmente a dos eventos extremos.

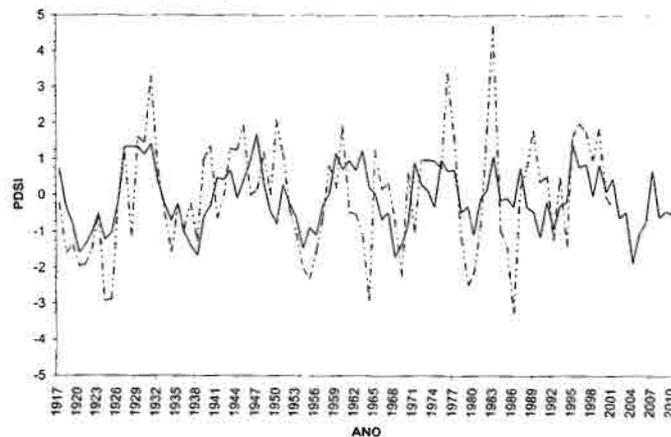


Figura 7: Séries temporais dos PDSI médios anuais em Piracicaba, observados entre 1917 e 2001 (linha tracejada) e ajustados entre 1917 e 2010 (linha contínua).

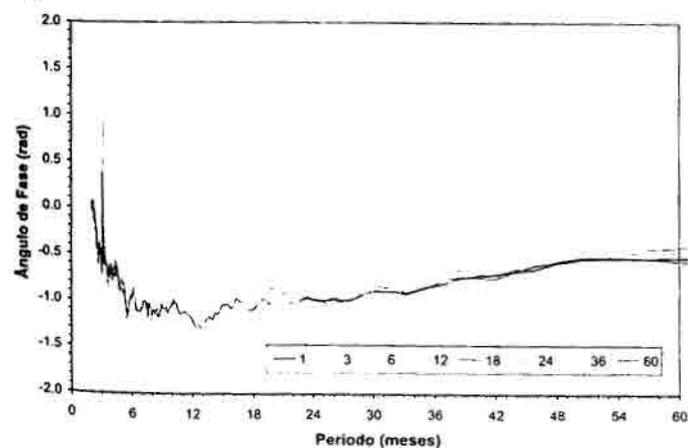
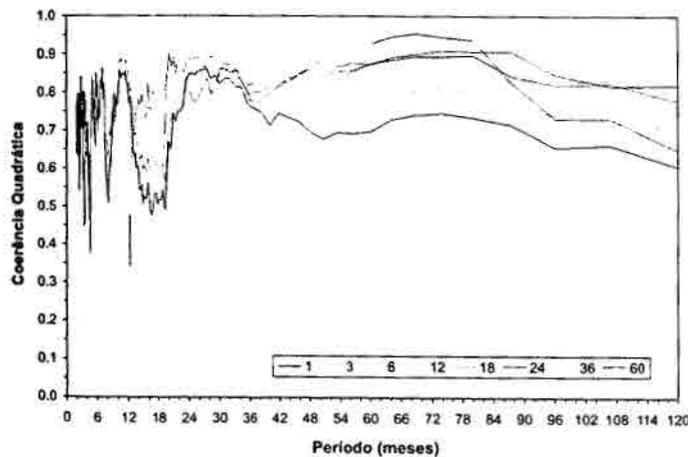


Figura 6: Coerências quadráticas e ângulos de fase entre o PDSI e os SPI 1-60, em Piracicaba.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que o PDSI e os SPI entre 1 e 60 meses são bastante linearmente relacionados, indicando que a precipitação é o processo dominante no PDSI, apesar dos dois índices estarem sistematicamente defasados de $\sim 57^\circ$, devido à atuação no PDSI dos outros processos relacionados ao balanço hídrico.

O PDSI apresentou uma excepcional memória de ~ 20 anos, que pôde ser explorada para fins de previsão, enquanto que os diferentes SPI, que podem ser interpretados como simples processos de média móvel, não apresentaram periodicidades significativas.

No período considerado (1917-2001), definiram-se pelo PDSI 6 eventos moderados de seca e 1 extremo, com durações entre 7 e 23 meses. Pelo SPI6, ocorreram 6 eventos moderados de seca e 1 extremo, com durações entre 6 e 17 meses.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, P. V. & SILVA, V. P. R. Índice de seca para a microregião do agreste da Borborema, no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 66-72, 1994.

ALLEY, W. M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Boston, v. 23, p.1100-1109, 1984.

O PDSI apresentou 8 periodicidades significativas a 95% de probabilidade, de 7,7; 17,0; 14,2; 5,7; 8,5; 6,6; 21,3 e 42,5 anos, que explicam ~57% da variância total da série (15+9+6,4+6,3+5,4+5,4+4,7+4,7%). As funções de densidade espectral e de distribuição de potência para o PDSI encontram-se na Figura 3. Observa-se na Figura 3B que o PDSI apresenta uma longa memória que pode se estender por mais de 20 anos.

Na Figura 4 encontram-se as séries temporais para os SPI de 3 a 60 meses em Piracicaba, no período de 1917 a 2001. Nota-se que os períodos mais secos ou chuvosos representados pelos SPIs nas 7 escalas de tempo consideradas, são mais suavizados no caso dos maiores intervalos (12 – 60 meses), por serem calculados usando as precipitações médias móveis de períodos mais longos.

Nenhum SPI entre 1 e 60 meses apresentou periodicidades significativas a 95%. Na Figura 5 encontram-se as funções de densidade espectral do SPI 1 e de distribuição de potência para os diversos SPI, de 1 a 60 meses. Verifica-se que os diferentes SPIs apresentam memórias inferiores ao PDSI. O SPI 1 de um dado mês depende dos SPI dos 12 meses anteriores, o SPI 6 dos 72 anteriores, o SPI 12 dos 120 anteriores, etc.

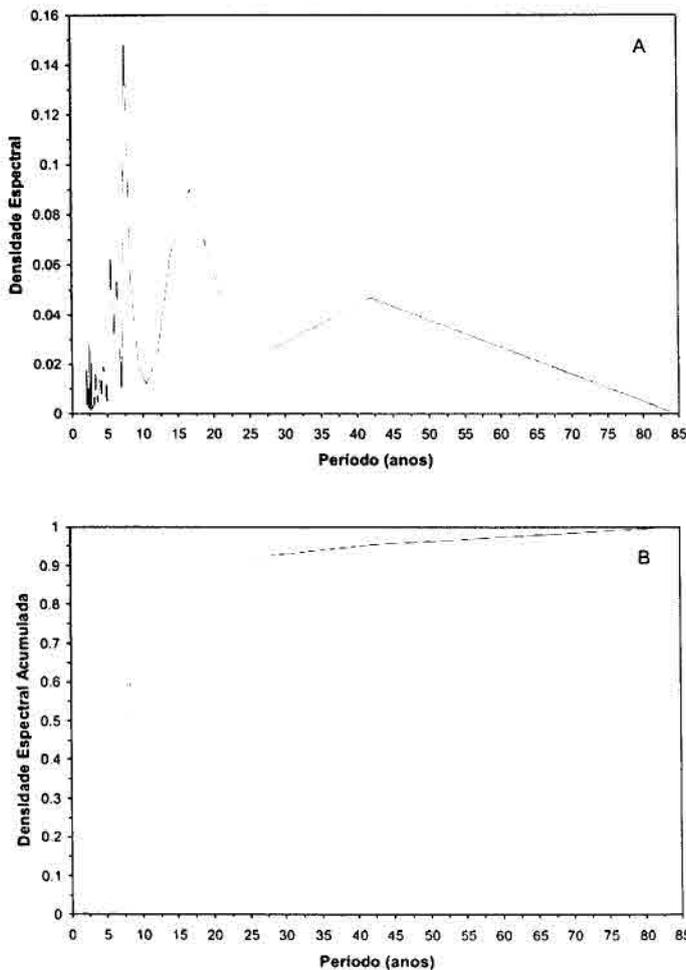


Figura 3: Funções de densidade espectral a) e de distribuição de potência b) do PDSI em Piracicaba.

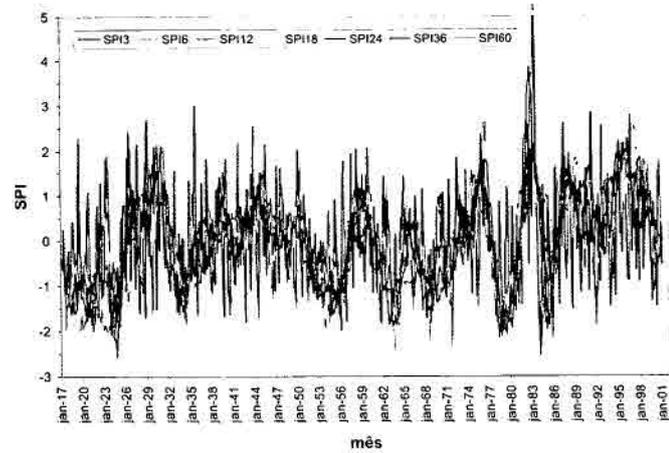


Figura 4: Séries temporais dos SPI entre 3 e 60 meses para Piracicaba (1917-2001).

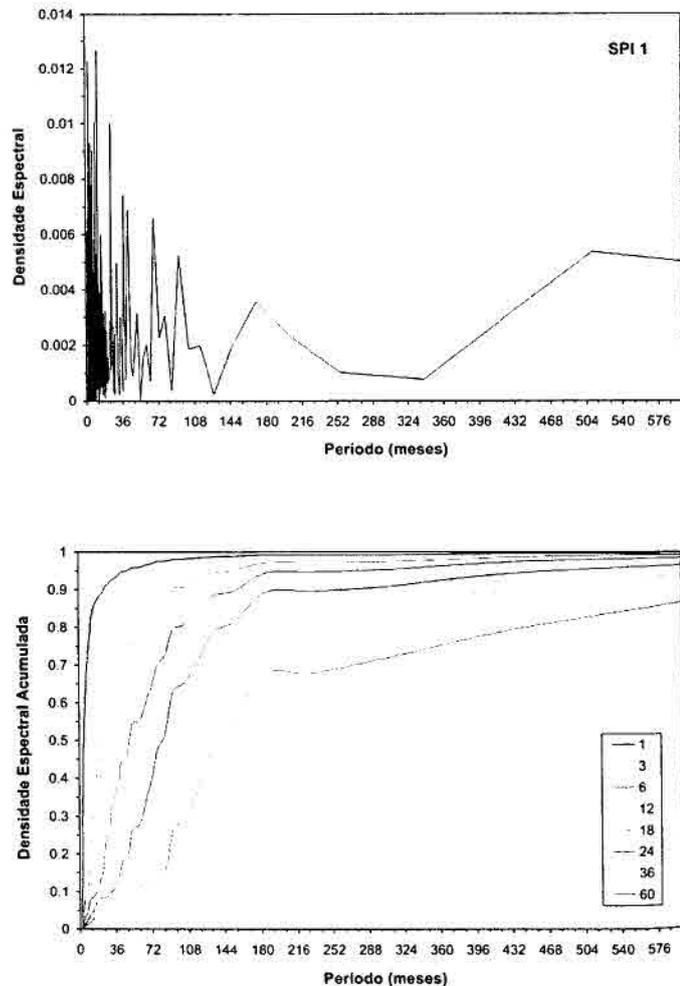


Figura 5: Funções de densidade espectral do SPI 1 e de distribuição de potência dos diversos SPI, de 1 e 60 meses, em Piracicaba.

- BALLING, R. C. Century-long variations in United States drought severity. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 82, p. 293-299, 1996.
- BRUNINI, O.; PINTO, H. S.; ZULLO, J.; BLAIN, G. C.; BRUNINI, A. P. C.; 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, **Anais**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Fortaleza, p. 251-252, 2001.
- BYUN, H. R. & WILHITE, D. A. Objective quantification of drought severity and duration. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, p. 2747-2756, 1999.
- DRACUP, J. A.; LEE, K. S. & PAULSON, G. On the statistical characteristics of drought events. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 2, p. 289-296, 1980a.
- DRACUP, J. A.; LEE, K. S. & PAULSON, G. On the definition of droughts. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, n. 2, p. 297-302, 1980b.
- GUTTMAN, N. B. Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. **Journal of the American Water Resources Association**, Washington, v. 34, n. 1, p. 113-121, 1998.
- HAYES, M. J.; SVOBODA, M. D.; WILHITE, D. A. & VANYARKHO, O. V. Monitoring the 1996 drought index using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 80, n. 3, 1999.
- KARL, T. Some spatial characteristics of drought duration in the United States. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, 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 potential evapotranspiration. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 25, p. 313-329, 1986.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, Centerton, v. 8, n. 1, p. 1-40, 1955.
- LIMA, M. C.; SANTOS, R. C. & MORAES, J. C. Estudo de secas no Estado de Alagoas: VI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Maceió, p.160-169, 1989.
- McKEE, T. B.; DOESKEN, N. J. & KLEIST, J. Drought monitoring with multiple time scales: 9th Conference on Applied Climatology, **Preprints**, American Meteorological Society, Boston, p. 233-236, 1995.
- 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**. Research Paper n. 45, Weather Bureau, Washington, 58 p., 1965.
- SANTOS, F. A. S. & ANJOS, R. J. Utilização do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) no monitoramento da seca no Estado de Pernambuco. I: XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, **Anais**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Fortaleza, p.121-122, 2001.
- SANTOS, J. M.; MORAES, J. C. & PAIÃO, L. B. F. O índice de aridez de Palmer: uma análise crítica: V Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais**, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, Belém, p. 296-301, 1987.
- SHIMSHONI, M. On Fisher's test of significance in harmonic analysis. **Geophysical Journal of the Royal Astrophysical Society**, London, v. 23, p.373-377, 1971.