

Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento

Spatial analysis of drought events in the Piauí state based on standardized precipitation index and cluster analysis

RESUMO

A ocorrência de eventos de secas influencia de forma negativa o desenvolvimento sócio-econômico de regiões semiáridas. Neste estudo foi utilizado o Índice Padronizado de Precipitação – SPI, em diferentes escalas temporais para identificar e quantificar a intensidade e duração das secas ocorridas no Estado do Piauí. Foi analisada a relação entre as secas e sub-regiões delimitadas pelos métodos de agrupamentos K-means e Ward. Apenas alguns eventos de seca permaneceram nas escalas maiores do SPI 12 e 24 meses, sendo que a maioria deles ocorreu entre as partes centrais e sul do Estado. A comparação de eventos de seca com os de El-Niño mostrou que há correlação positiva entre eles, principalmente quando se trata dos eventos de seca mais intensos.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de agrupamento; IPP e semiárido.

ABSTRACT

The occurrence of drought impacts negatively on the socio-economic development of semiarid regions. This study used the Standardized Precipitation Index - SPI, on different time scales to identify and quantify the intensity and duration of droughts in the Piauí state. The relationship between droughts and the dry sub-regions were evaluated by the clustering methods K-means and Ward. Only a few drought events were classified on larger scales (12 and 24 months) of the SPI, the majority of which occurred between the southern and central parts of the state. The comparison of drought events with El Niño showed a positive correlation, especially for the most intense drought events.

KEYWORDS: Cluster analysis; SPI and semiarid

Roni Valter de Souza Guedes
Meteorologista, D.Sc., Pós-Graduando, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFCG
Campina Grande, PB, Brasil
roniguedes84@yahoo.com.br

Maria José Herculano Macedo
Licenciada em Matemática, D.Sc., Pós-Graduanda, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFCG
Campina Grande, PB, Brasil
mariejhm@hotmail.com

Francisco de Assis Salviano de Sousa
Meteorologista, Prof. Associado D.Sc., Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFCG
Campina Grande, PB, Brasil
fassis@dca.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

Em todo o Planeta, entre 1967 e 1992, as secas afetaram 50% do total de 2,8 bilhões de pessoas que sofreram todos os tipos de catástrofes naturais. Por causa de impactos diretos e indiretos 1,3 milhões de vidas humanas foram perdidas, de um total de 3,5 milhões de pessoas mortas por catástrofes (OBASI, 1994). Assim sendo, percebe-se a importância do monitoramento das secas (evolução ao longo do tempo, frequência e intensidade).

As secas dependem dos sistemas meteorológicos que atuam na região, do relevo e dos fenômenos climáticos de grande escala que influenciam as variáveis que definem o comportamento e a circulação da atmosfera. Muitas regiões do globo estão suscetíveis a ocorrência de secas, principalmente as regiões equatoriais onde a insolação é maior. No Nordeste Brasileiro, além de fatores físicos e geográficos, a seca pode estar associada a fenômenos como o El Niño/Oscilação Sul e o Dipolo do Atlântico (aquecimento/esfriamento do Atlântico Norte/Sul) (MELO, 1999; ALVES, 1997).

O índice de seca conhecido por SPI (em inglês, Standardized Precipitation Index) foi desenvolvido por McKee et al. (1993) com o objetivo de monitorar e analisar a seca em diferentes escalas de tempo. Esse índice é vantajoso em relação aos demais porque utiliza apenas dados mensais de precipitação, variável monitorada em todas as estações meteorológicas. Desde que foi proposto, o SPI vem sendo usado em vários estudos, devido sua capacidade de quantificar o déficit ou excesso de precipitação em diversas escalas temporais e permitir comparações entre regiões com diferentes características climáticas. Assim, diversos trabalhos científicos têm demonstrado o seu potencial no monitoramento do fenômeno das secas, determinando

sua intensidade e espacialização (BUSSAY et. al, 1999; SZALAI e SZINELL, 2000; LANA et. al, 2001; HUGHES e SAUNDERS, 2002; TSAKIRIS & VANGELIS, 2004; TONKAZ, 2006; BLAIN & BRUNINI, 2007, MACEDO et. al, 2010).

A análise de agrupamento é uma técnica estatística de análise multivariada e tem como objetivo principal classificar os indivíduos de uma população, que são conhecidos por suas características, em grupos que sejam homogêneos intragrupos e heterogêneos intergrupos. Essa técnica é utilizada por diversos pesquisadores para os mais diversos fins, merecendo destaque na área meteorológica. Gong & Richman (1995) aplicaram várias técnicas de análise de agrupamento a dados pluviométricos na região central e leste da América do Norte a fim de identificar o melhor desempenho dos métodos não hierárquicos em relação aos hierárquicos. Ramos et al. (2001) analisaram padrões pluviométricos no Nordeste da Espanha através dos métodos de agrupamento K-Means e Ward. O primeiro método revelou classificação semelhante e o segundo apresentou maior poder de discriminação. Já Unal et al. (2003) testaram cinco métodos de agrupamentos a dados de temperatura, o destaque ficou com o método de Ward.

Historicamente o Nordeste do Brasil, principalmente a região semiárida, apresenta sérios problemas de disponibilidade de recursos hídricos. A escassez, às vezes, mais severa em alguns municípios provoca impactos sociais, econômicos e ambientais. A identificação da severidade da seca ou falta de disponibilidade de água requer uma metodologia que também espacialize os pontos mais críticos, a fim de que as autoridades municipais, estaduais e federais possam tomar decisões quanto à proposta de solução para cada caso, objetivando minimizar os efeitos da estiagem prolongada. Na literatura especializada se destacam várias

metodologias no sentido de desenvolver índices de chuva capazes de detectar longos períodos de estiagens, bem como classificá-los em termos de intensidade e duração, definindo diferentes tipos de seca.

O objetivo deste trabalho é o de quantificar e espacializar a ocorrência de secas do tipo severa e extrema, nas escalas temporais de 3, 6, 12 e 24 meses no estado do Piauí, utilizando o Standardized Precipitation Index - SPI ou Índice Padronizado de Precipitação – IPP. Após delimitar sub-regiões pluviometricamente homogêneas pelos métodos de agrupamento de Ward e K-means.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram usados os totais mensais precipitados de 33 postos pluviométricos do Estado do Piauí, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), cujas séries apresentam longo período de registros (1963-2000) e estão espacialmente bem distribuídos, conforme mostra a Figura 1A. Já no gráfico da precipitação média anual (Figura 1B) é possível verificar que os maiores valores de chuva ocorrem no litoral, acima de 1300 mm e os menores sobre a região sudeste do estado do Piauí, região semiárida, chegando a valores inferiores a 700 mm próximo à divisa com o estado do Pernambuco.

2.1 Índice Padronizado de Precipitação (IPP)

O cálculo do IPP ou SPI requer uma série de dados mensais com no mínimo trinta anos. O índice é determinado a partir das funções de densidade de probabilidade que descrevem as séries históricas de precipitação em diferentes escalas de tempo. Os dados de totais mensais precipitados de cada um dos postos pluviométricos foram

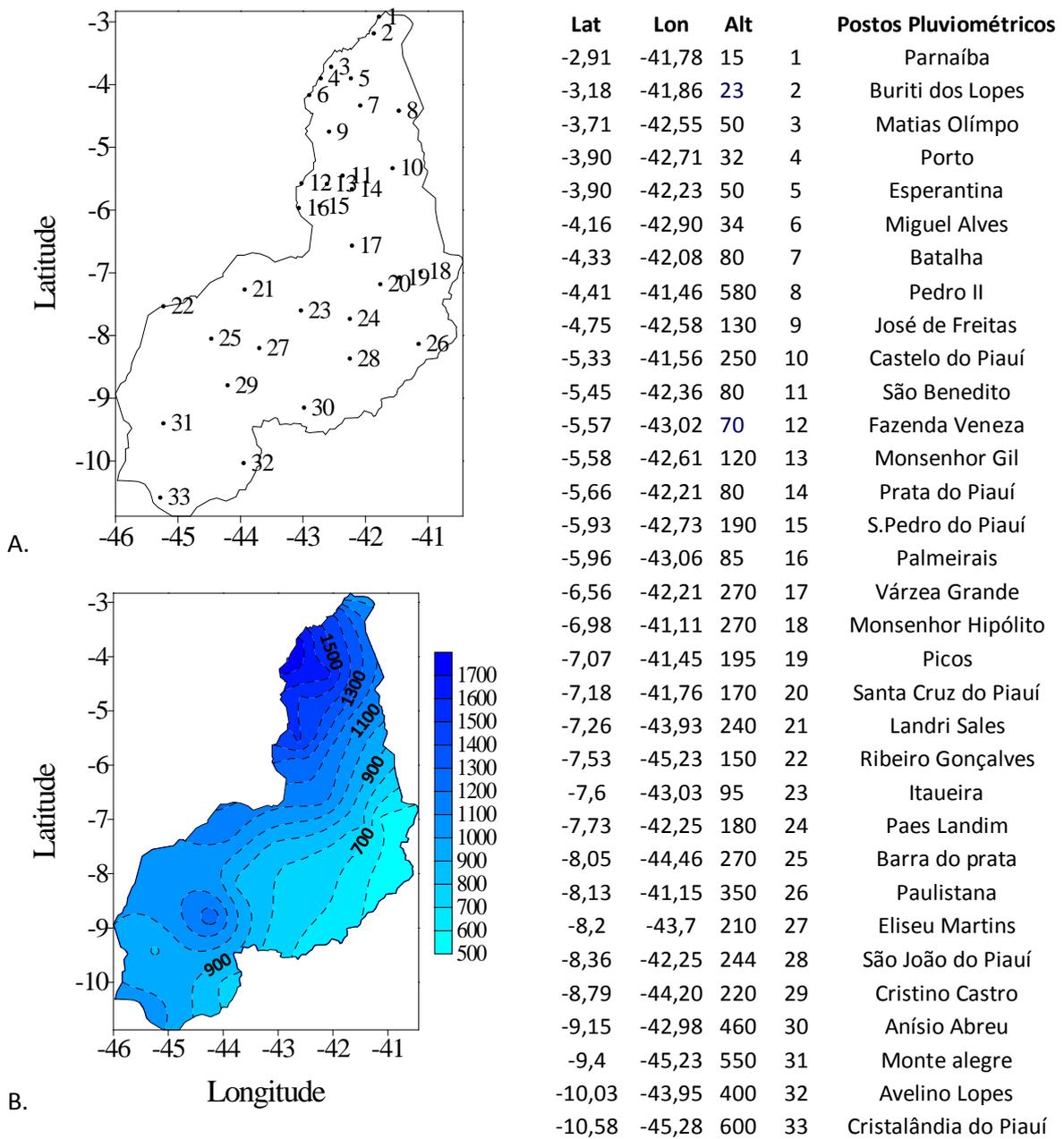


Figura 1 - Distribuição espacial dos postos pluviométricos selecionados (A) e distribuição espacial da precipitação média anual (B).

ajustados à distribuição de probabilidade Gama, equação 1.

$$g(x) = \frac{1}{B^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b} \quad (1)$$

em que $a > 0$ é o parâmetro de forma; $b > 0$ é o parâmetro de escala e $x > 0$ é quantidade de chuva precipitada. A função Gama é obtida através da equação 2:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} y^{a-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

Os parâmetros a e b da função densidade de probabilidade Gama são estimados para cada posto pluviométrico e escala de tempo de interesse. Para estimar os parâmetros a e b se utilizam as soluções de Máxima Verossimilhança.

$$\hat{a} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

em que:
$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

e,
$$\hat{b} = \frac{\bar{x}}{\hat{a}}$$

N é o número de observações da amostra e \bar{x} é o valor médio dos dados de chuva.

A função acumulada de probabilidade Gama é dada pela equação 3:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{a})} \int_0^x t^{\hat{a}-1} e^{-t} dt \quad (3)$$

A função Gama $\Gamma(a)$, não é definida para $x=0$, mas como a amostra dos dados de precipitação

pode conter zeros, a probabilidade acumulada (equação 4) é dada:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (4)$$

em que q é a probabilidade de ocorrer um zero. Se m for o número de zeros em uma série de n dados de precipitação, então $q = m/n$. Segundo Abramowitz & Stegun (1965) a relação entre as distribuições de probabilidade Gama e Normal pode ser obtida através das equações 5 e 6, sendo seus parâmetros obtidos pelas equações 7 e 8, respectivamente:

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

para $0 < H(x) \leq 0,5$ (5)

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

para $0,5 < H(x) < 1,0$ (6)

Sendo, $c_0 = 2,515$; $c_1 = 0,803$; $c_2 = 0,010$; $d_1 = 1,433$; $d_2 = 0,189$; $d_3 = 0,001$;

em que
$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}$$

para $0 < H(x) \leq 0,5$ (7)

e
$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)}$$

para $0,5 < H(x) < 1,0$ (8)

O cálculo do SPI inicia com o ajuste das séries de totais mensais precipitados à função densidade de probabilidade Gama. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada total mensal é estimada. A função Normal inversa Gaussiana é aplicada a essa probabilidade resultando no valor SPI. O evento seca ocorre no

período em que o valor do índice é continuamente negativo. O evento seca cessa quando os valores se tornam positivos.

Como o SPI é normalizado, climas úmidos e secos podem ser representados. Desse modo, este índice pode monitorar tanto os períodos úmidos quanto os secos (TSAKIRIS & VANGELIS, 2004). Análises pontuais ou regionais de valores do índice SPI em diversos postos fornecem informações locais dos impactos de diferentes tipos de seca. De acordo com Pires (2003), os primeiros efeitos são oriundos da seca meteorológica, que aponta déficits da precipitação em relação a valores normais, mostrando um desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação. Depois ocorre a seca agrícola que reduz a disponibilidade hídrica no solo, prejudicando as culturas existentes. Quando a duração aumenta surge a seca hidrológica, que se relaciona com os níveis médios de água nos reservatórios superficiais, subterrâneos e depleção de água no solo.

Os tipos de secas estão associados diretamente às escalas temporais do SPI, quanto maior a duração, maior o déficit hídrico e consequentemente maiores os prejuízos econômicos e sociais. SPI até 3 meses reflete as condições de água no solo em curto e médio prazos e fornece a estimativa da precipitação sazonal. O SPI-3 meses é também sensível às grandes variações na magnitude da chuva em regiões e períodos do ano em que a precipitação é muito reduzida ou muito elevada, sendo assim torna-se indispensável à climatologia da região. A informação do SPI-6 meses está associada às anomalias das reservas de água e às vazões dos rios. O SPI-9 meses fornece indicação de padrões de precipitação, uma vez que as secas podem demorar uma estação do ano ou mais para ocorrerem. O SPI-12 meses está diretamente associado à escassez de água em forma de vazão, e aos níveis de água

Tabela 1 – Classificação de secas baseada no SPI

Valores do SPI	Classe
2,00 ou mais	Chuva extrema
1,50 a 1,99	Chuva severa
1,00 a 1,49	Chuva moderada
0 a 0,99	Chuva fraca
0 a -0,99	Seca fraca
-1,00 a -1,49	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Seca severa
-2,00 ou menos	Seca extrema

dos lençóis subterrâneos. É interessante observar que as escalas maiores do SPI tendem a esconder algumas ocorrências de precipitação, pois valores positivos ficam inseridos na precipitação acumulada de cada período. Ou seja, valores negativos em escalas maiores não significam ausência total de precipitação no período. A determinação do valor do índice negativo ou positivo para certo período (escala) é feita por comparação com os totais de precipitação para o mesmo período (escala) de todos os anos da série. Valores de SPI inferiores a -1,5 para essas escalas temporais representam um bom indicador de que impactos significativos estão ocorrendo no setor agrícola, assim como em outros setores. Desse modo, neste trabalho foram detectadas apenas as secas com valores abaixo de -1,5, correspondentes às categorias severa e extrema (DOMINGOS, 2006).

2.2 – Métodos de Agrupamentos (Cluster)

Existem dois tipos de métodos ou algoritmos de classificação de grupos. O primeiro é o método hierárquico, em que a partição dos grupos se dá a partir de um mínimo de grupos não definidos inicialmente. Os grupos majoritários são divididos em sub-grupos minoritários agrupando aqueles indivíduos que apresentam características semelhantes. A estrutura final das classes é

apresentada sob a forma de uma árvore de classificação (dendrograma) que apresenta uma síntese objetiva dos resultados. Enquanto, o segundo é o método não hierárquico de classificação o número de grupos é definido a priori. Nos dois métodos de agrupamentos a classificação dos indivíduos em grupos distintos é feita a partir de uma função de agrupamento e de um critério matemático de agrupamento (EVERITT, 1993).

O método K-means possui um algoritmo de aprendizagem que organiza n objetos em k partições cada uma representa um grupo. O funcionamento dele é descrito por dividir os objetos em k grupos e, a partir da similaridade do valor da média dos atributos numéricos, agrupar os demais objetos em torno destes grupos previamente indicados.

O método de Ward é um método hierárquico que utiliza a distância euclidiana para medir a similaridade ou dissimilaridade entre os indivíduos. Propõe ainda que em qualquer fase da análise a perda de informação que resulta do agrupamento de elementos entre grupos seja medida pela Soma dos Quadrados dos Desvios (SQD) de cada ponto à média dos elementos do grupo à qual pertence (EVERITT, 1993).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram destacadas aqui apenas as secas de categorias mais

intensas, com valores de SPI abaixo de -1,5, ou seja, categorias severas e extremas, pois elas são mais capazes de identificar os problemas mais críticos nos recursos hídricos do Estado do Piauí, apontando os meses de precipitação acumulada bem abaixo da média do mesmo período. Na Tabela 1 é possível verificar todas as secas severas e extremas, identificadas nos 33 postos em análise, para as escalas do SPI de 3 e 6 meses, com os respectivos anos de ocorrências e durações. Pelo SPI - 3 meses verifica-se que em 18 postos ocorreram secas do tipo severas e ainda duas secas do tipo extrema, nos municípios de Cristalândia e Itaueira, marcados em negrito. O posto de Palmeirais apresentou cinco ocorrências de secas severas. O SPI - 6 meses, identificou 16 postos com secas do tipo severa. É interessante observar que algumas secas apontadas pelo SPI - 3 também foram identificadas pelo SPI - 6 no mesmo ano. Esse fato mostra que suas intensidades foram mais significativas, pois acabaram afetando diferentes escalas temporais, ou ainda, a precipitação ocorrida no período não foi suficiente pra suprir o déficit hídrico para a escala maior.

Outra observação é que algumas secas ocorridas no SPI - 6 não foram detectadas pelo SPI - 3, isso significa que houve ocorrência de baixas magnitudes de precipitação em determinado mês que impediu a seca no trimestre, mas foi insuficiente para impedir a ocorrência de secas severas em períodos maiores.

Tabela 2. Descrição da ocorrência e duração de secas severas e extremas nas escalas de 3 e 6 meses no período de 1963 a 2000.

Postos	IPP-3			IPP-6		
	Anos (início/fim)	Duração (meses)	Tipo	Anos (início/fim)	Duração (meses)	Tipo
1. Parnaíba	1990	7	Severa	1987/88 1990	12 11	Severa
2. Buriti dos Lopes				1992/93	21	Severa
3. Matias Olímpio				1991/94	38	Severa
4. Porto				1981 1982/83	10 22	Severa
5. Boa Esperança	1990	4	Severa			
6. Miguel Alves	1999	2	Severa			
9. José de Freitas	1964/65	5	Severa	1980/81	12	Severa
11. São Benedito	1990	4	Severa			
13. Monsenhor Gil	1982/83	3	Severa	1994/95	6	Severa
14. Prata do Piauí	1982/83	16	Severa	1980/83	37	Severa
15. São Pedro do Piauí	1990	4	Severa			
16. Palmeirais	1982/83	11	Severas			
	1987/88	7				
	1990	4				
	1995	3				
18. Monsenhor Hipólito	1997	2				
	1992/93	10	Severa			
19. Picos	1992	4	Severa	1964/65 1982/84	10 15	Severas
20. Santa Cruz do Piauí	1982/83	9	Severas			
	1992	4		1982/84	15	Severa
21. Landri Sales	1963	3	Severas	1971/72	11	Severas
	1986/87	4		1983	2	
22. Ribeiro Gonçalves				1972/73	9	Severa
23. Itauera	1969	3	Extrema			
	1980	5	Severa			
25. Barra do Prata	1980	5	Severas	1982/83	13	Severas
	1982/83	9				
	1986/87	8		1985/87	20	
	1994/95	4				
26. Paulistana				1975/76	11	Severa
28. São João do Piauí				1991	9	Severa
29. Cristino Castro	1980	2	Severa			
32. Avelino Lopes	1993/94	3	Severa	1975/76	10	Severa
33. Cristalândia	1982/83	3	Severa	1984	2	Severas
				1986/87	9	
	1984	2	Extrema	1997/99	25	

Na Tabela 3, o SPI – 12 meses revelou 10 postos com secas, sendo nove severas e uma extrema em Paulistana, sendo esta, identificada anteriormente no SPI-06 com categoria severa. Já o SPI - 24 meses resultou em 5 postos com secas severas. Assim como foi visto na Tabela 2, algumas secas severas foram identificadas em várias escalas do índice usado, por

exemplo, em Barra do Prata a seca de 1986 foi identificada nas escalas de 3, 6, 12 e 24 meses, significando que a precipitação ocorrida durante o período de pelo menos três anos não foi suficiente para melhorar a situação hídrica no município, nem mesmo em pequena escala.

A confirmação de que os recursos hídricos do Estado do Piauí são bastante vulneráveis a

alterações no clima se deu pela quantidade de secas identificadas pelas categorias fraca e moderada. Embora não sejam tão intensas elas indicam tendência de escassez hídrica, tendo em vista que fenômenos de escala global, como por exemplo, El Niño, podem reduzir a atuação dos sistemas meteorológicos de escala regional. Portanto, categorias de secas menos

Tabela 3. Descrição da ocorrência e duração de secas severas e extremas nas escalas de 12 e 24 meses no período de 1963 a 2000.

Postos	IPP-12			IPP-24		
	Anos (início/fim)	Duração (meses)	Tipo	Anos (início/fim)	Duração (meses)	Tipo
1. Parnaíba	1990/91	14	Severa			
3. Matias Olímpio				1991/95	45	Severa
11. São Benedito				1990/95	53	Severa
16. Palmeirais	1980/84	40	Severa			
19. Picos	1982/84	25	Severa			
20. Santa Cruz do Piauí	1982/84	25	Severa			
23. Itaueira	1982/84	17	Severa			
25. Barra do prata	1986/89	35	Severa	1986/89	37	Severa
26. Paulistana	1975/77	16	Extrema			
27. Eliseu Martins	1982/84	27	Severa	1983/85	27	Severa
28. São João do Piauí	1982/84	24	Severa			
32. Avelino Lopes	1975/77	24	Severa	1976/77	24	Severa

Tabela 4. Classificação dos anos em relação aos fenômenos El Niño/La Niña.

Anos (início/fim)	Classificação
1972/73	El Niño
1978/79	El Niño
1982/83	El Niño
1983/84	La Niña
1990/95	El Niño
1997/98	El Niño
1998/00	La Niña

Fonte: CPTEC, 2010 e El Niño e La Niña, 2010.

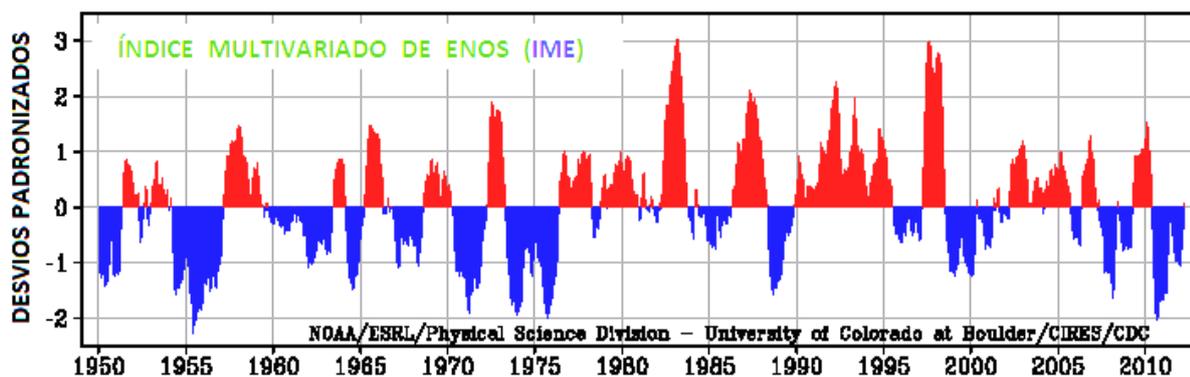


Figura 2. Variação do índice multivariado de enos. Fonte: NOAA (2012).

intensas podem evoluir para mais intensas, dependendo da atuação de fenômenos externos. Segundo Alves (1997), a atuação de fenômenos externos impede o posicionamento “constante” do sistema Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT) para o setor norte do Nordeste brasileiro. A precipitação no norte do Piauí está diretamente associada a este sistema.

A maioria das secas severas mostradas nas Tabelas 2 e 3 ocorrem concomitantemente com os eventos de El Niño de 82/83 e 90/95. O evento de La Niña de 83/84 parece ter atuado no Piauí cessando

algumas secas, mas não foi forte o suficiente para se prolongar e recuperar o armazenamento hídrico na região, pois, ocorreram eventos de secas nesses anos como também nos anos de 85 a 88. A Tabela 4 mostra os períodos com ocorrência de El Niño ou La Niña de acordo com CPTC (2010).

A intensidade do fenômeno El Niño Oscilação Sul – ENOS, para cada ano, a Figura 2 mostra o comportamento do Índice Multivariado de Enos (IME), que considera na sua composição as seguintes variáveis: pressão ao nível do mar, as componentes zonal e meridional do vento na superfície, a temperatura da superfície do mar, a temperatura do ar na superfície e um indicador de nebulosidade. Através desta figura é possível comparar a ocorrência de todas as secas ocorridas no Piauí com os El Niños, os valores mostram que nos períodos de 82/83 e 90/95 citados anteriormente são fortes e prolongados, mostrando que existe uma boa correlação entre as secas e o IME para este Estado. No entanto, duas localidades (Paulistana e Avelino Lopes) apresentaram ocorrência de seca nos anos de 75/77 que são anos de La Niña. Ou seja, a relação nem sempre é positiva, pois existem outros sistemas atuantes e fatores locais que também interferem, como orografia (ambas as localidades estão em região de serras) e ausência de umidade.

A Figura 3 mostra a espacialização dos eventos de secas severas/extremas sobre o estado do Piauí, de acordo com o SPI, em diferentes escalas temporais. Como visto nas Tabelas 2 e 3, o número de secas é menor para escalas maiores devido ao nível crítico que os recursos hídricos devem atingir para se verificar secas nas escalas de 12 ou 24 meses. É comum nos estados do Nordeste Brasileiro, a ocorrência de períodos de estiagem acima de 6 meses. As secas detectadas pelos SPI - 3 e 6 meses se devem aos baixos índices de precipitação em dado

mês, deixando o acumulado trimestral ou semestral abaixo da média do mesmo período. Já nos SPI - 12 e 24 meses, a ocorrência de secas é menor visto que algumas áreas se recuperaram durante o período chuvoso, ou seja, para a seca ser detectada é necessários muitos meses com índice de chuva abaixo da média a fim de que não haja recuperação dos valores críticos desse índice no período. Isso ocorre com mais frequência na parte central do Estado, conforme a Figura 3C do SPI - 12 meses.

De acordo com as análises de agrupamentos realizadas por estes autores em Macedo et. al. (2009) encontrou-se três grupos homogêneos para o Piauí com a utilização do método K-means e em por Guedes et. al. (2010) quatro grupos pelo método de Ward. Os resultados comprovam que o segundo método tem maior poder discriminante, visto que separa os grupos não apenas por padrão de precipitação, mas também por intensidade, Figuras 4 e 5.

Comparando as Figuras 3 e 4, se observa que as secas afetam todos os grupos de ambos os métodos para escalas menores. Isso era esperado devido à alta variabilidade da chuva no Estado, e também comprova que os mecanismos causadores da seca atuam em todo o Estado, reforçando a influência da circulação de grande escala. As escalas maiores do SPI (12 e 24 meses) tiveram a maioria dos seus eventos de seca localizados nas partes sul e central, onde se observam menores frequências e intensidades de chuva, conforme a Figura 1B da precipitação média anual e a Figura 5 da precipitação mensal por região, o que torna os efeitos ainda mais graves. Também podem ser notadas ocorrências de secas, mesmo na região mais úmida do Estado (porção norte), em todas as escalas do SPI, como, por exemplo, nos postos de Parnaíba para o SPI-12 meses e Matias Olímpio para o SPI-24 meses. Esse fato demonstra que o SPI pode ser

apropriado tanto para regiões secas quanto para úmidas, mas deve-se observar que para regiões áridas o SPI identifica melhor as escalas temporais maiores que o período de estiagem, ou durante período com chuva, pois este identifica as variações temporais quando compara os valores de chuva com as normais climatológicas, se em um período a média é muito baixa, o SPI nesta mesma escala não identifica secas intensas. De acordo com Wu et al. (2007), a análise para 4 semanas dentro de um período seco em uma região árida não permite identificação de categorias secas pelo SPI. Por isto, neste trabalho se considerou apenas períodos superiores a 3 meses, com destaque para as escalas de 12 e 24 meses do SPI. Assim, as regiões com altos índices pluviométricos apresentam ocorrência de secas quando esses índices decrescem de forma significativa de modo a interferir diretamente na oferta hídrica.

A disponibilidade hídrica vista na Figura 1B apresenta irregularidade sazonal, mostrada na Figura 5, para cada grupo, delimitado pelo método de Ward (Figura 4B). Observe que existem dois padrões de precipitação para o Piauí, os grupos 1 e 2 representam o primeiro padrão, com precipitação mais intensa de janeiro a maio, oriunda do litoral, por isso o grupo 1 (verde escuro) possui valores maiores que no grupo 2 (verde claro). O segundo padrão é representado pelos grupos 3 e 4, com precipitação iniciando em novembro e finalizando em abril. Os valores do grupo 4 (amarelo lima) são maiores que os do grupo 3 (laranja), isso indica que os sistemas precipitantes vêm do sul. As chuvas mais intensas na parte norte do Estado são explicadas pela proximidade do Oceano Atlântico, que serve de fonte de energia e umidade para os sistemas atuantes de escala regional ZCIT, Vórtice Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) e também local (brisas marítimas, lacustre e vale montanha). Já na

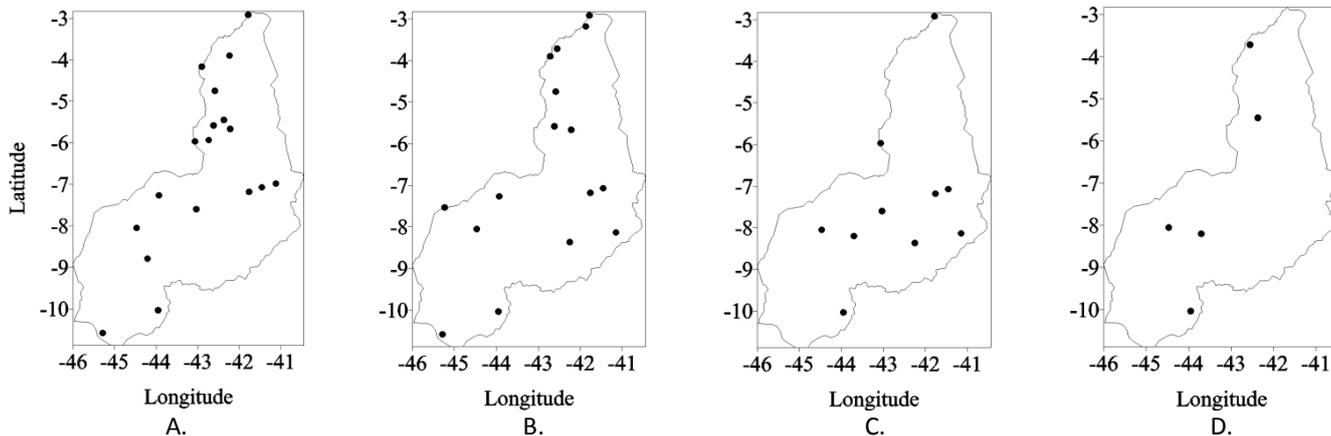


Figura 3. Distribuição espacial da ocorrência de secas severas no estado do Piauí, (A) SPI-3 meses, (B) SPI-6 meses, (C) SPI-12 meses e (D) SPI-24 meses.

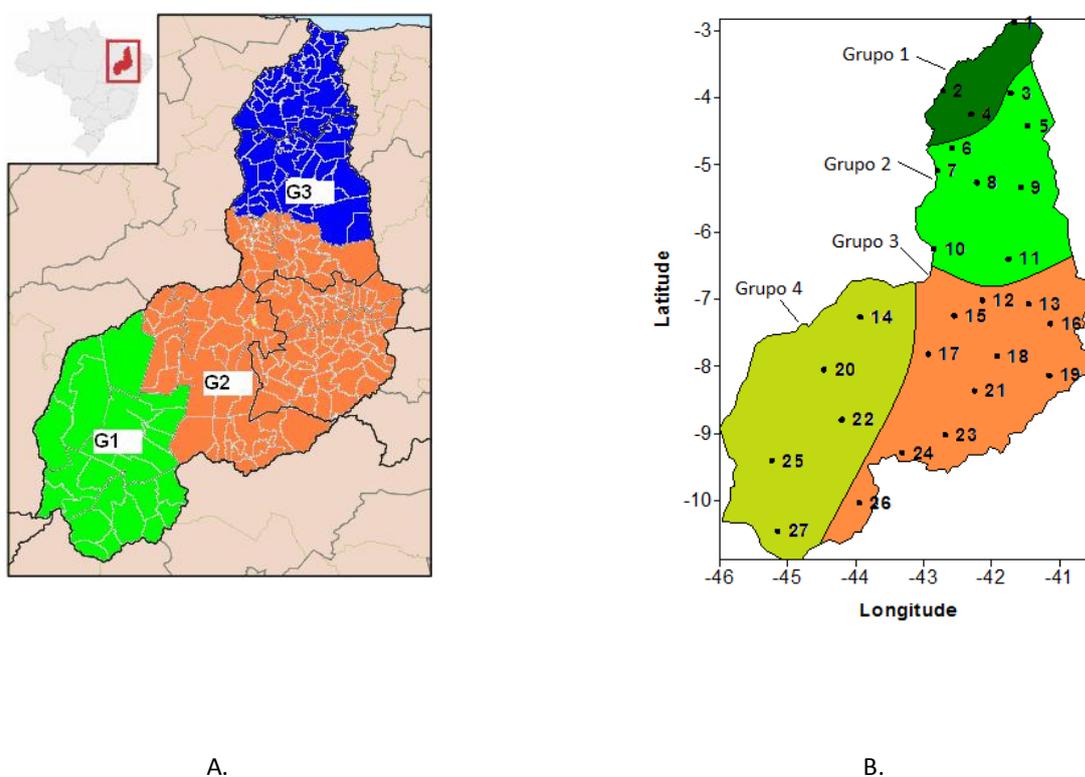


Figura 4. Grupos homogêneos de precipitação para o Piauí, (A) K-means, (B) Ward.
Fonte: GUEDES, et. al. (2010)

parte sul e central a chuva anual é menor e influenciada pela umidade vinda da Floresta Amazônica, pela ZCOU (Zona de Convergência de Umidade formada sobre o planalto central) e pela circulação secundária, haja vista que o sul do Estado é uma região serrana.

A ocorrência de secas na parte sul e principalmente na parte central é mais propícia, pois a dinâmica dos sistemas meteorológicos fica prejudicada no

interior do continente devido à orografia e ausência de fontes energéticas. Isto produz uma maior vulnerabilidade às alterações da atmosfera produzidas por eventos externos que acabam reduzindo a precipitação como mostra a Figura 5 nos grupos 3 e 4. Com uma menor disponibilidade de recursos hídricos o ar se torna menos úmido sobre a região e a precipitação pode ficar abaixo da média se a umidade

oriunda de outros locais for alterada de alguma forma.

4. CONCLUSÃO

O Estado do Piauí apresenta irregularidade pluviométrica devido à sua localização geográfica e ao relevo acentuado na região sudeste. Essa região apresentou maior frequência de ocorrência de secas nas escalas temporais de 3 e 6 meses, sendo mais comum a seca

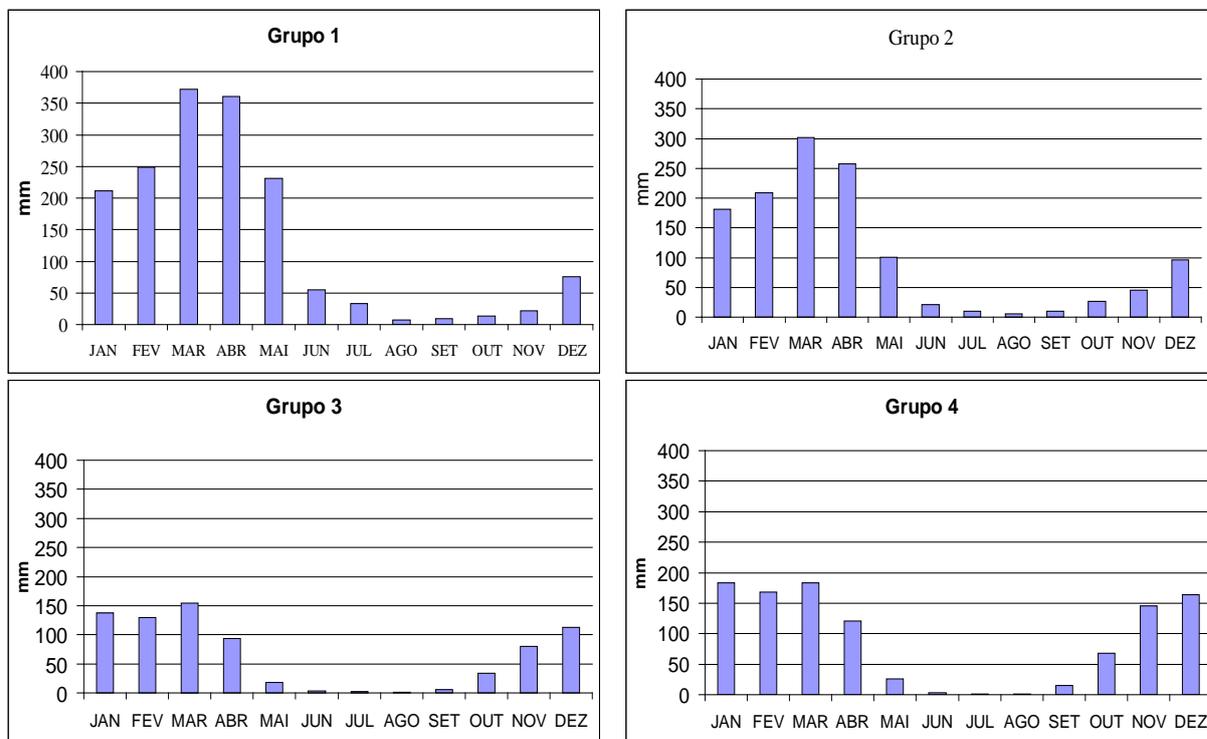


Figura 5. Precipitação média mensal referente ao período 1963 a 2000 de cada região homogênea (grupo).

meteorológica, estas secas devem estar relacionadas a atrasos no início do período chuvoso ou ter o seu fim antecipado. O SPI também identificou a ocorrência de secas nas escalas de 12 e 24 meses, caracterizando secas agrícolas e hidrológicas, com maior concentração na parte central do Estado, que é a região com menor total pluviométrico e com maior variabilidade, indicando que a maior duração das secas também está associada ao acoplamento com o período de estiagem, agravando a situação ainda mais.

A maioria dos eventos de secas em todas as escalas temporais teve relação positiva com anos de El Niño. Os anos de 1982/1984 e 1990/1995 apresentaram secas em vários postos pluviométricos distribuídos por todo o Estado. Essas secas se correlacionaram com os eventos de El Niño forte ocorridos em 1982/83 e 1990/95. Como a precipitação se origina de vários fatores, nem sempre a grande escala atua como fator dominante, nos postos de Avelino Lopes e Paulistana ocorreram secas nos anos de 1975/1976, porém em presença do fenômeno La Niña. Isso mostra que existem outros fatores que podem influenciar também na ocorrência de

precipitação sobre o Piauí. Outro fator de grande escala que altera bastante a configuração dos sistemas e consequentemente a chuva no Nordeste é o dipolo do Atlântico. Os anos de El Niño com dipolo positivo são propícios a seca, por isto é recomendado que se faça uma análise das configurações do Atlântico sobre os anos de seca identificados neste trabalho.

Algumas secas foram identificadas pelo SPI nas escalas temporais de 3, 6, 12 e 24 meses. Esses eventos merecem maior atenção devido ao impacto importante na disponibilidade hídrica do Estado, sendo as secas de escala maior mais agravantes. A região centro-sul do Estado carece de mecanismos de previsão e projetos para mitigação dos efeitos de secas - essa região, além de apresentar baixos índices pluviométricos, é influenciada negativamente por eventos externos que reduzem a oferta de recursos hídricos em relação à expectativa climatológica, caracterizando as categorias de secas detectadas pela metodologia aqui utilizada.

A identificação e a análise das secas mostrou que a grande escala influencia a intensidade e que apenas os fenômenos ENOS não são

determinantes, pois é provável que o Atlântico também produza alterações significativas. Estes resultados indicam que a seca está presente em todas as décadas sobre o Estado do Piauí e, por isto, a implantação de projetos nas áreas mais suscetível deve ser contínuo. Os órgãos operacionais devem focar a previsão das secas a partir das variações negativa de TSM sobre o Pacífico e principalmente sobre o Atlântico na costa nordestina. A aplicação do SPI pode mostrar a tendência de déficit hídrico com as escalas menores e seu agravamento com o aumento gradual da escala, sendo possível a identificação pontual por município que apóie análises em situações de emergência ou calamidade pública.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANA pela disponibilização dos dados utilizados no estudo, e ao CNPQ/CAPES pelo fornecimento das bolsas de estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I. A. **Handbook of Mathematical Functions with formulas, graphs, and mathematical tables**, 1046 pp, 1965.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema de informações hidrológicas (HidroWeb). Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 26 abr. 2010.
- ALVES, J. M. B. Aspectos climatológicos do nordeste brasileiro com ênfase a região semi-árida: principais causas da variedade pluviométrica interanual. IN: 1º SIMPÓSIO SOBRE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO, **anais...** Petrolina, 1997.
- ARAÚJO, S. M. B. **Estudo da Variabilidade Climática em Regiões Homogêneas de Temperaturas Médias do ar no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.
- BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise Comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer Adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.1, p.105-111, 2007.
- BUSSAY, A.; SZINELL, C.; SZENTIMERY, T. Investigation and Measurements of Droughts in Hungary. Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary, 1999.
- DOMINGOS, S. I. S. **Análise do índice de seca standardized precipitation index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer drought severity index (PDSI)**. Tese (Licenciatura). Universidade de Lisboa, Portugal, 62p, 2006.
- EVERITT, B. S. **Cluster analysis**. Heinemann Educational Books, London: Academic Press, 3ª edição, p.170, 1993.
- GONG, X.; RICHMAN, M. R.; On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the Rockies. **Journal of Climate**, v.8, p. 897-924, 1995.
- GUEDES, R. V. S.; LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no estado do Piauí e agrupamento pelo método de Ward. **Revista de Geografia**, Recife, pp 218-233, 2010.
- HUGHES, B. L. E SAUNDERS, M.A. A Drought climatology for Europe, **International Journal of Climatology**, pp 22, 1571-1592, 2002.
- LANA, X.; SERRA, C.; BURGUENO, A. Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index, **International Journal of Climatology**, pp 21, 1669–1691, 2001.
- MACEDO, M. J. H.; BRAGA, C. C.; DANTAS, F. R. C.; SILVA, E. D. V. Variabilidade espacial e da pluviometria no Estado do Piauí. 3º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, **anais...** Canela: Sociedade Brasileira de Meteorologia, outubro, 2009.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: EIGHT CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8.,1993, Boston. **Anais American Meteorological Society**. Boston: Preprints, p.179-184, 1993.
- MELO, J. C. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. **Raízes**, ano XVIII, v. 20, p. 13-21, 1999.
- NOAA, [National Oceanic and Atmospheric Administration](http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#data), Earth System Research Laboratory, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#data>, acesso em junho, 2012.
- OBASI, G.O.P. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. **Bulletin American Meteorological Society**, 75 (1), 655–1661, 1994.
- PIRES, V. **Frequência e Intensidade de Fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra, Universidade de Lisboa, Portugal, pp.98, 2003.
- SZALAI S, SZINELL C. Comparison of two drought indices for drought monitoring in Hungary — a case study. In DROUGHT AND DROUGHT MITIGATION IN EUROPE, Vogt JV, Somma F (eds). Kluwer: Dordrecht; 161–166, 2000.
- TSAKIRIS, G; VANGELIS, H. Towards a drought watch system based on spatial SPI. **Water resources management**, v.18, p. 1-12, 2004.
- TONKAZ, T. Spatio-temporal assessment of historical droughts using SPI with GIS in GAP. Region, Turkey. **Journal of Applied Sciences**, v.12, n.6, p. 2565-2571, 2006.
- UNAL, Y.; KINDAP, T.; KARACA, M. Redefining the climate zones of Turkey using cluster Analysis. **International Journal of Climatology**, v.23, p.1045–1055, 2003.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping of optimize an objective function. **Jornal American Statistical Association**, 58:236-244, 1963.
- WU, H.; SVOBODA, M.D.; HAYES, M.J.; WILHITE, D.A.; WEN, F. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons, **International Journal of Climatology**, V.27, P.65-79, 2007

Recebido em: junho/2011
Aprovado em: junho/2012