



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Tendências observadas da evapotranspiração potencial no estado de Alagoas (1961-2016)

Fabício Daniel dos Santos Silva¹, Rafaela Lisboa Costa², Manuel Agostinho Victor Antonio³, Eliseu Oliveira Afonso³, Dário Mário dos Santos³, Nelson Pedro Antonio Mateus³, Jaime Fernando Antonio³

¹ Professor Dr. ICAT-UFAL, Av. L. M. Mota, S/N, CEP 57072-900, Maceió, Alagoas, (82) 3214-1365, E-mail: fabricao.santos@icat.ufal.br (autor correspondente). ² Doutora em Geociências. Universidade de Brasília, Brasília-DF, (61) 98614-6782, E-mail: rafaelalisboac@gmail.com. ³ Graduandos em Meteorologia, ICAT-UFAL, e-mail: manuelvictorantonio@outlook.com, E-mail: eliseuafonso2011@hotmail.com, E-mail: deltasigma9419@gmail.com, E-mail: mateus12es@gmail.com, E-mail: jaimefernandoantonio@gmail.com.

Artigo recebido em 22/07/2017 e aceito em 25/02/2018

RESUMO

Neste estudo utilizou-se a equação de Penman-Monteith para analisar os padrões temporais de mudanças da Evapotranspiração Potencial (ETP), para as três mesorregiões do Estado de Alagoas: sertão, agreste e litoral, com base na composição regional das séries temporais desta variável a partir de estações meteorológicas localizadas em cada uma das regiões, para o período 1961-2016. Os maiores valores médios diários da ETP ocorrem no sertão, seguido do agreste e litoral, com máximos de outubro a março, e mínimos de abril a setembro. As tendências foram analisadas para trimestres representativos das estações do ano, e em nível anual, via regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, e pelo teste sequencial de Mann-Kendall, com o objetivo de encontrar também os pontos de ruptura que indicam o provável início das tendências. No verão observou-se tendências positivas e estatisticamente significativas, por regressão linear e teste de MK apenas para o agreste, assim como no outono, a partir da década de 80. O inverno foi a única estação onde as três regiões apresentaram a mesma tendência, negativa, e com significância estatística. Na primavera o sertão apresenta tendência de decréscimo dos valores diários da ETP, estatisticamente significativa, enquanto no agreste a tendência é de aumento também com significância pelos dois métodos de análise, com o litoral apresenta tendência negativa mas sem significância. Em suma, anualmente, percebe-se tendências estatisticamente significantes de decréscimo da ETP média diária no sertão e de aumento no agreste, enquanto há predomínio de neutralidade no litoral. Investigar estas diferenças torna-se um objetivo futuro de pesquisa, a fim de analisar a maior contribuição para as tendências, seja pela componente radiativa ou pela componente aerodinâmica da equação de PM.

Palavras-chave: comportamento climático, mudança climática, evapotranspiração.

Observed trends of potential evapotranspiration in the state of Alagoas (1961-2016)

ABSTRACT

In this study, the Penman-Monteith equation was used to analyze the temporal patterns of Potential Evapotranspiration (PET) changes for the three mesoregions of the State of Alagoas: sertão, agreste and litoral, based on the regional composition of the time series of this variable from meteorological stations located in each of the regions, for the period 1961-2016. The highest daily mean values of ETP occur in the sertão, followed by the agreste and litoral, with maximum and minimum values from October to March, and April to September, respectively. The trends were analyzed for the three representative months of the seasons, and at the annual level, using linear regression using the least squares method, and by the Mann-Kendall sequential test, with the objective of also finding the break points that indicate the probable beginning trends. In the summer, positive and statistically significant trends were observed, by linear regression and MK test, only for the agreste, as well as in autumn, starting from the 80's. Winter was the only season where the three regions showed the same trend, negative, and with statistical significance. In the spring the sertão shows a tendency to decrease the daily values of the ETP, statistically significant, while in the agreste the trend is also increased with significance by the two methods of analysis, with the litoral showing a negative but not significant trend. In summary, annually, there are statistically significant decreases in the mean daily ETP in the sertão and increase in the agreste, while there is a predominance of neutrality in the littoral. Investigating these differences becomes a future research goal in order to analyze the major contribution to the trends, be it by the radiative component or the aerodynamic component of the PM equation.

Keywords: climatic behavior, climatic change, evapotranspiration.

Introdução

Muitos estudos têm se encarregado de analisar tendências de aumento/diminuição ao longo dos anos da precipitação e temperatura. Tais pesquisas tomaram impulso após a criação do IPCC (em inglês, Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), que investiga as alterações climáticas em curso no planeta, afirmando com 95% de confiabilidade que o clima do planeta está efetivamente sendo alterado (IPCC, 2013).

Os estudos sobre tendências climáticas visam evidenciar que mudanças nos padrões médios conhecidos já vem ocorrendo no planeta (Frich et al., 2002). Para a América do Sul, Gomez (1999) já mostrava tendências de aumento das temperaturas máximas e mínimas entre Colômbia e Venezuela. Diante dos estudiosos que começavam a se multiplicar analisando tendências em diversas regiões do planeta, surgiu a necessidade de avaliar se não apenas as séries em longo prazo, mas também se os extremos apresentavam tendências significativas. Apoiada neste argumento, a Organização Meteorológica Mundial (OMM), criou um grupo de trabalho encarregado de criar índices para detecção de possíveis mudanças climáticas. Ao todo foram concebidos 27 índices para análises de extremos, sendo 11 para precipitação e 16 para temperatura, índices práticos e de fácil definição aplicáveis, em sua maior parte, a qualquer local do globo (Zang; Yang, 2004, Zhang et al, 2005).

Para o Brasil muitos estudos tentando identificar tendências em séries de precipitação e temperatura já foram realizados, em particular para a região Nordeste, embora quase nunca contemplando toda a região, mais fragmentados a localidades, sub-regiões ou Estados específicos (Santos; Brito, 2007, Santos et al., 2009, Silva; Silva et al., 2012; Nobrega et al., 2015).

Ainda com foco na região Nordeste, Marengo et al., (2006) mostram que existe uma tendência predominantemente positiva no aumento das temperaturas, principalmente das temperaturas mínimas, diminuindo a amplitude térmica diária, o que deve provocar diretamente um aumento da Evapotranspiração Potencial (ETP) desta região, e que esta tendência continua para diferentes cenários futuros de mudanças climáticas. No caso do Nordeste, que tem a maior parte de sua área inserida no clima semiárido, o aumento na ETP associado a já conhecida alta

variabilidade espaço-temporal da precipitação, pode prejudicar ainda mais as atividades agrícolas, notadamente as de sequeiro, como no caso do cultivo do algodão herbáceo.

A ETP é um importante parâmetro para caracterização do ciclo hidrológico, estudos agrícolas e ambientais. Nesta pesquisa trabalha-se com a ETP calculada pelo método Penman-Monteith estimada de acordo com os procedimentos propostos por Allen et al., (1998), caracterizada por duas componentes principais, a radiativa dependente diretamente da energia solar disponível, e a aerodinâmica que caracteriza o poder de secagem do ar, principalmente devido à velocidade do vento e à umidade atmosférica. Estudos mostram que em regiões quentes e secas a componente aerodinâmica tem sua maior relevância para a ETP (Matsoukas et al., 2011; McVicar et al., 2012).

Estudos para diferentes partes do globo mostram que a ETP tem apresentado mudanças nas últimas décadas, alternando regiões com tendências negativas (Zuo et al., 2012; Fan e Thomas, 2013), e regiões com tendências positivas (Darshana et al., 2013; Abteu et al., 2011; Kitsara et al., 2013). Nesta pesquisa a área de estudo é o Estado de Alagoas, com o objetivo geral de verificar se existem tendências em três séries temporais de ETP que representam as três grandes mesorregiões do Estado: sertão, agreste e leste alagoano.

Material e métodos

Dados Meteorológicos

O cálculo da ETP foi realizado com os dados meteorológicos diários de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no Estado de Alagoas, do período compreendido entre 1961 e 2016, conforme ilustrado na Figura 1. As estações de Água Branca e Pão de Açúcar estão localizadas no sertão alagoano, e suas séries foram compostas em uma única série representativa para o sertão, Palmeira dos Índios no agreste alagoano se constitui na série representativa desta mesorregião, e Maceió e Porto de Pedras no leste alagoano foram compostas em uma única série de referência para esta mesorregião. Os Metadados das estações estão na Tabela 1.

Localização dos municípios nas diferentes mesorregiões de Alagoas

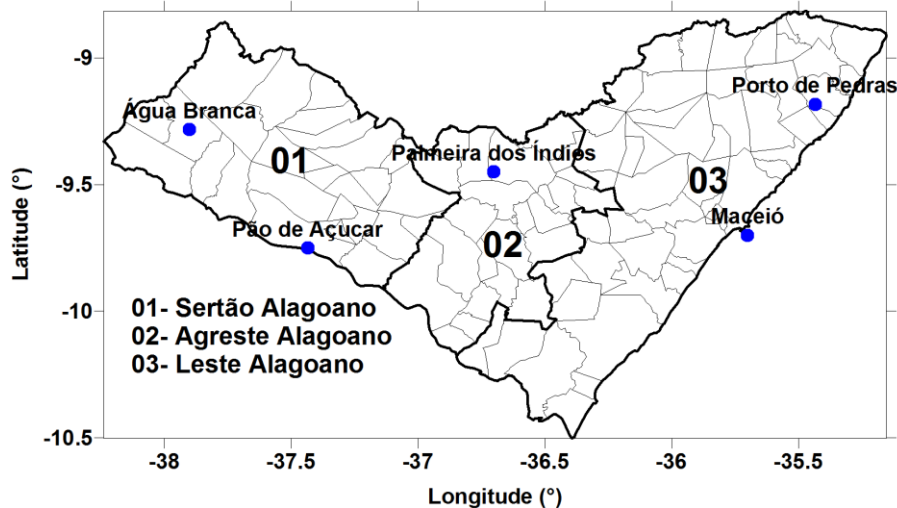


Figura 1. Distribuição geográfica das 5 estações meteorológicas convencionais do INMET nas mesorregiões do Estado de Alagoas.

Tabela 1. Código, nome, latitude, longitude e altitude das 5 estações meteorológicas do INMET no Estado de Alagoas.

Código da Estação	Nome da Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
82989	Água Branca	-9,28	-37,90	605,3
82990	Pão de Açúcar	-9,75	-37,43	19,1
82992	Palmeira dos Índios	-9,45	-36,70	274,9
82994	Maceió	-9,70	-35,70	64,5
82996	Porto de Pedras	-9,18	-35,43	50,02

Cálculo da ETP

A Comissão Internacional de Irrigação (ICID), a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) das Nações Unidas e a Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE) adotaram a equação de Penman-Monteith (PM) (Allen et al., 1998; Walter et al., 2000) como a técnica padrão para o cálculo de ETP a partir de dados climáticos. O método PM pode ser usado globalmente e foi amplamente verificado com base em dados de lisímetros de diversas regiões climáticas (Allen et al., 1994; Ventura et al., 1999; Itenfisu et al., 2000; López-Urrea et al., 2006). Allen et al (1998) simplificou a equação de PM, desenvolvendo a equação FAO-56 PM e definiu a superfície de referência como uma cultura hipotética (altura assumida de 0,12m, resistência superficial de 70 s/m, albedo de 0,23) que apresentou evaporação semelhante à de uma superfície extensa de grama verde de altura uniforme que cresce de forma ativa sem restrições hídricas. A ETP FAO-56 PM é expressa, em mm/dia, de acordo com a equação 1 (Vicente-Serrano et al., 2014).

$$ETP = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34U_2)} \quad (1)$$

em que: Rn é a radiação líquida na superfície da cultura e G é a densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻²dia⁻¹), T é a temperatura média diária (°C), U₂ é a velocidade média do vento medida a 2m de altura (m

s⁻¹), λ é o calor latente de evaporação da água igual a 2,45MJ/kg, Δ é a declividade da curva de pressão de vapor contra temperatura (kPa °C⁻¹), γ é a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), (e_s - e_a) é o déficit de pressão de vapor do ar para altura de referência medida e 900 é um coeficiente para a cultura de referência (kJ⁻¹kgKd⁻¹).

Desta forma percebe-se que a ETP é dependente diretamente de seis variáveis meteorológicas: pressão à superfície, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa (que determina o déficit de pressão de vapor), velocidade do vento e duração diária do sol (Allen et al., 1998). A ETP mensal para cada mesorregião foi calculada a partir dos valores diários calculados (média ou somatório), mesmo sabendo que o uso de dados diários pode ser mais problemático do que os mensais no que tange ao controle de qualidade e homogeneização. Devido a isto, os dados diários das seis variáveis passaram por um rigoroso sistema de controle de qualidade e eliminação de valores absurdos.

Análises Estatísticas - Abordagem Paramétricas das Tendências

Foram calculados os dados diários de ETP das três mesorregiões para o período 1961-2016, obtendo-se a climatologia de referência para todo este período. Todos os valores analisados são referentes a

valores médios diários, a níveis mensal, sazonal e anual.

Foram analisadas tendências para os trimestres considerados mais representativos para quatro estações do ano: Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF-Verão), Março-Abril-Maio (MAM-Outono), Junho-Julho-Agosto (JJA-Inverno) e Setembro-Outubro-Novembro (SON-Primavera). Tais séries sazonais foram confrontadas aos seus respectivos Desvios Padronizados (DP), a fim de se verificar tendências lineares nas principais mesorregiões do Estado nos trimestres que compreendem as estações do ano. O DP da ETP é obtido levando-se em consideração o tamanho da amostra dos dados (n), a média (\bar{x}), e o desvio padrão (s), dado pela equação 2:

$$DP = \frac{x_i - \bar{x}}{s}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

As tendências lineares são obtidas por funções de regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados, cuja tendência é dada pelo coeficiente angular da reta $y=ax+b$, estimada em relação ao eixo x. Para testar a significância estatística da tendência linear, a fim de verificar se a mesma não é consequência exclusiva da aleatoriedade intrínseca da variável em estudo, utiliza-se o p-valor, sendo considerados como possíveis mudanças climáticas àquelas em que o índice apresentar tendência linear (positiva ou negativa) superior ao erro padrão da estimativa e estatisticamente significativo ao nível de 0,05.

Análises Estatísticas - Abordagem Não-Paramétricas das Tendências

Não é confiável verificar e atestar a significância estatística de tendências apenas com a análise de regressão linear. Usar outra técnica, de preferência não paramétrica, é recomendável. Assim utilizou-se também o teste não-paramétrico de Mann-Kendall (MK) para determinar a existência e significância das tendências observadas. Uma vantagem da técnica é permitir detectar o ponto em que se inicia uma tendência e mudanças abruptas no clima (Kendall, 1975; Ryan et al., 1997). O teste de MK mostra a aleatoriedade ou não da tendência, sem a necessidade de se comprovar a normalidade das séries (Onoz e Bayazit, 2003; Machiwal e Jha, 2008; Some'eet al., 2013).

Seja as observações X_1, X_2, \dots, X_n de uma série temporal. Podemos aplicar o teste de MK para tendência (Z_{MK}) somente se a série for serialmente independente. Então, queremos testar se as observações da série são independentes e

identicamente distribuídas, isto é, queremos testar as hipóteses H_0 (Não há tendência pois as observações da série são independentes e espacialmente distribuídas) ou H_1 (Há tendência pois existe uma tendência monotônica no tempo das observações). Sob H_0 , a estatística de teste é dada por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (3)$$

onde, para casos com $n > 30$:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, se S > 0 \\ 0, se S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma}, se S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O teste de Mann-Kendall (MK) consiste em calcular duas séries de valores estatísticos, uma a partir do início e outra a partir do final da série. Estas séries são mostradas sob a forma de duas curvas denominadas respectivamente de curva direta U_i e curva retrógrada U'_i . A tendência é significativa quando a curva $U(t)$ excede o limiar superior a 5% ou $[U_i] > 1,96$, suportada pela estimativa do p-valor proveniente do teste t de Student. Sneyers (1975) demonstra a utilidade desse teste, usando suas formas progressiva e retrógrada, para identificar os intervalos nos quais as tendências são mais pronunciadas, além dos pontos de inflexão e/ou mudanças climáticas. O ponto que marca o início da mudança corresponde à intersecção entre as curvas direta U_i e retrógrada U'_i . Graficamente, as curvas retrógradas e diretas são frequentemente confusas quando não há uma tendência significativa na série. Quando os valores de $U(t)$ são significativos, conclui-se a uma tendência crescente ou decrescente, para $U(t) > 0$ ou $U(t) < 0$, respectivamente.

Por fim analisa-se o coeficiente de correlação denominado de τ (tau) de Kendall ou Kendall- τ , uma medida de associação para variáveis ordinais. Sua principal vantagem sobre medidas comuns de correlação é a de não ser influenciado pela variância ou outliers. Este coeficiente é definido como:

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (5)$$

Onde n_c é o número de pares concordantes, n_d o número de pares discordantes. τ representa a probabilidade de que dois pontos da distribuição conjunta dos pares sejam concordantes, variando de -1 a 1 similar ao coeficiente de correlação de Pearson (r).

Resultados e Discussão

Análise Climatológica

A normal climatológica da ETP é mostrada na Figura 2, para as três mesorregiões do Estado de Alagoas. Os valores da ETP são uma resposta à demanda atmosférica por água, logo os valores mínimos médios mensais das mesorregiões ocorrem nos meses de junho e julho, como resposta ao período do ano onde as temperaturas apresentam os menores valores anuais, assim como a menor quantidade de radiação solar direta que atinge a superfície e os valores mais elevados da umidade relativa, já que estes dois meses fazem parte do trimestre mais chuvoso do Estado: MJJ. Nas três mesorregiões o período de máximos valores da ETP se

dá no semestre de outubro a março, com picos máximos entre os meses de fevereiro e março, enquanto o semestre de abril a setembro marca o período do ano com os menos valores da ETP, com picos mínimos nos meses de junho e julho. No sertão, a ETP varia de 5,8mm/dia em fevereiro a 4,0mm/dia em julho, no agreste varia de 5,6mm/dia em fevereiro a 3,8mm/dia em julho, enquanto no litoral, a amplitude da ETP entre os meses é menor devido a menor amplitude térmica por efeito da oceanidade, com pico de 5,1mm/dia em março e 4,4mm/dia em julho.

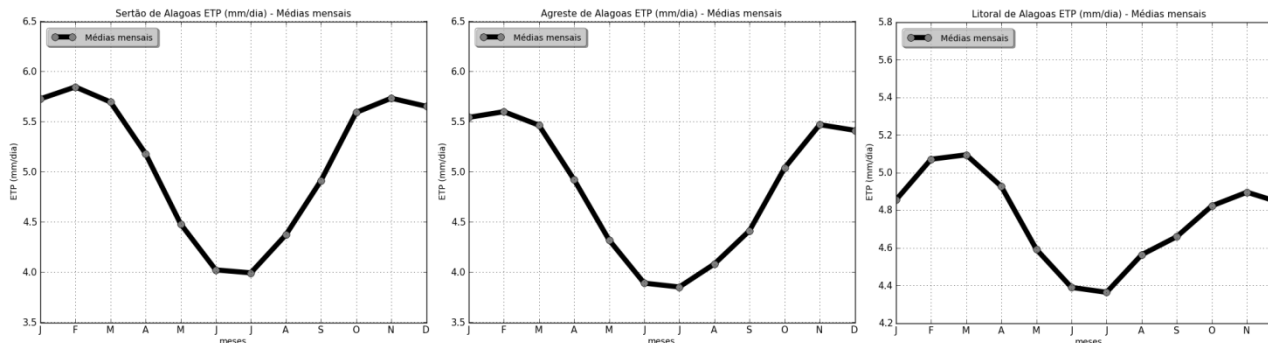


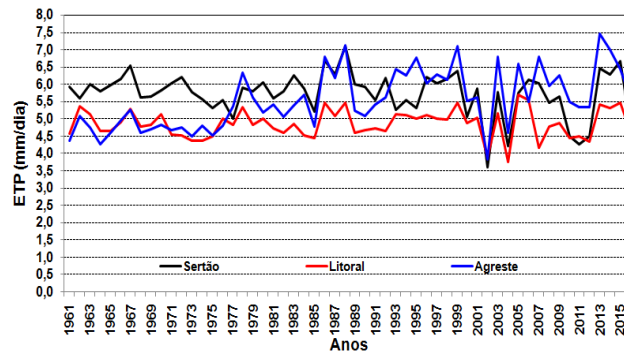
Figura 2. Normal climatológica mensal da ETP (mm/dia) em no sertão, agreste e litoral alagoano, respectivamente.

Ritmo Mensal da ETP nas Mesorregiões

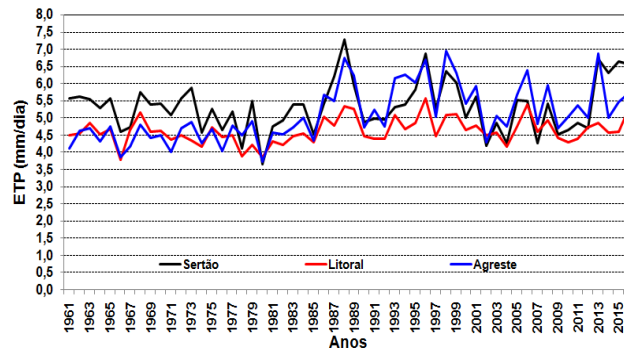
A Figura 3 mostra, na seqüência, a variação mensal da ETP ao longo do período 1961-2016. Dos gráficos percebe-se que os valores da ETP no sertão foram maiores que nas outras áreas para a maioria dos meses, principalmente entre janeiro e março, e setembro a dezembro, período mais quente do ano no Estado, do início da série em 1961 até o início da década de 80. O que se nota a partir da década de 80 é a aproximação dos valores médios mensais da ETP entre as regiões principalmente nos meses mais chuvosos e de temperaturas mais amenas, entre abril e setembro.

O objetivo de analisar estes gráficos não foi observar tendências, e sim a variabilidade natural da variável ao longo dos anos. No entanto percebe-se, principalmente para o agreste, elevação dos valores da ETP de outubro a abril. Nos meses de junho, julho e agosto, percebe-se a tendência de diminuição dos valores da ETP nas três mesorregiões do Estado. Nos meses mais quentes do ano, outro ponto interessante é que se pode observar picos que acontecem principalmente em anos de fortes eventos niño, nos anos de 1987, 1998 e 2015.

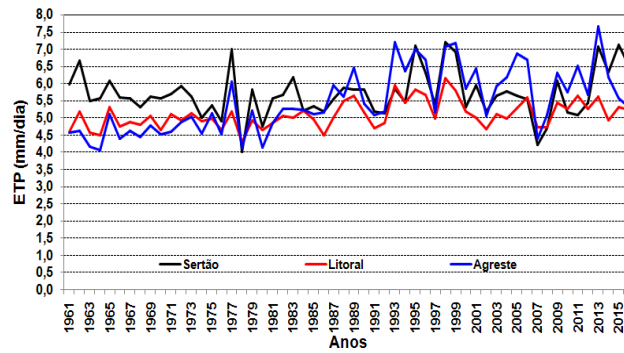
ETP média mensal para Janeiro (mm/dia) - Período 1961-2016



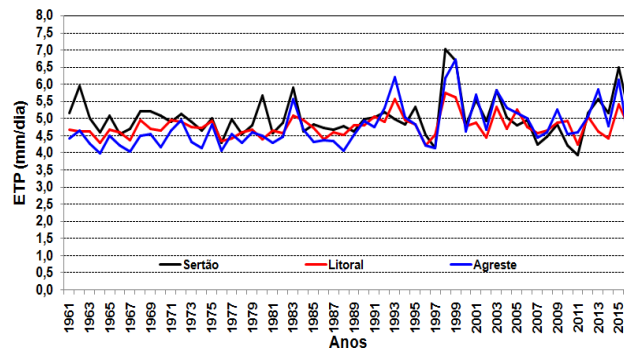
ETP média mensal para Fevereiro (mm/dia) - Período 1961-2016



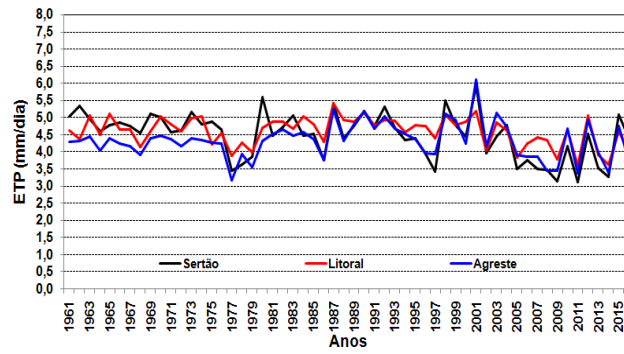
ETP média mensal para Março (mm/dia) - Período 1961-2016



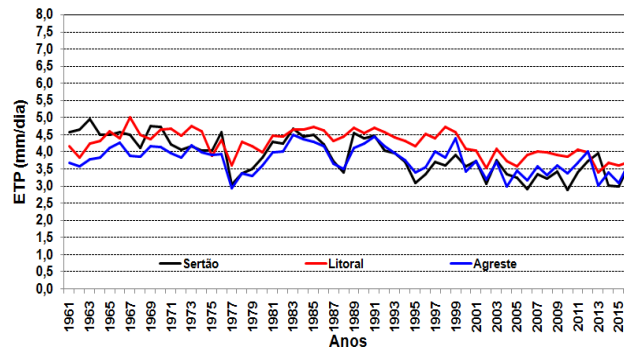
ETP média mensal para Abril (mm/dia) - Período 1961-2016



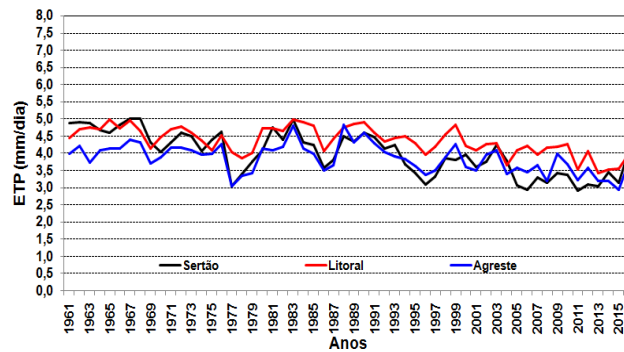
ETP média mensal para Maio (mm/dia) - Período 1961-2016



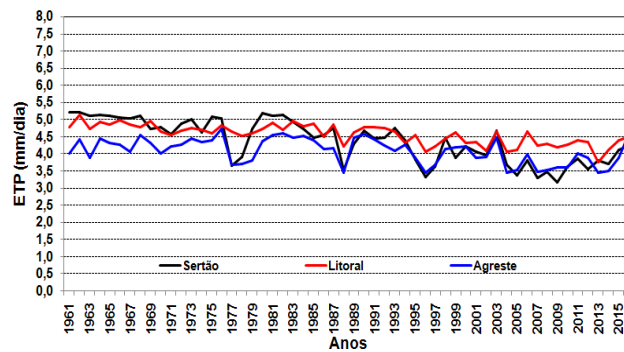
ETP média mensal para Junho (mm/dia) - Período 1961-2016



ETP média mensal para Julho (mm/dia) - Período 1961-2016



ETP média mensal para Agosto (mm/dia) - Período 1961-2016



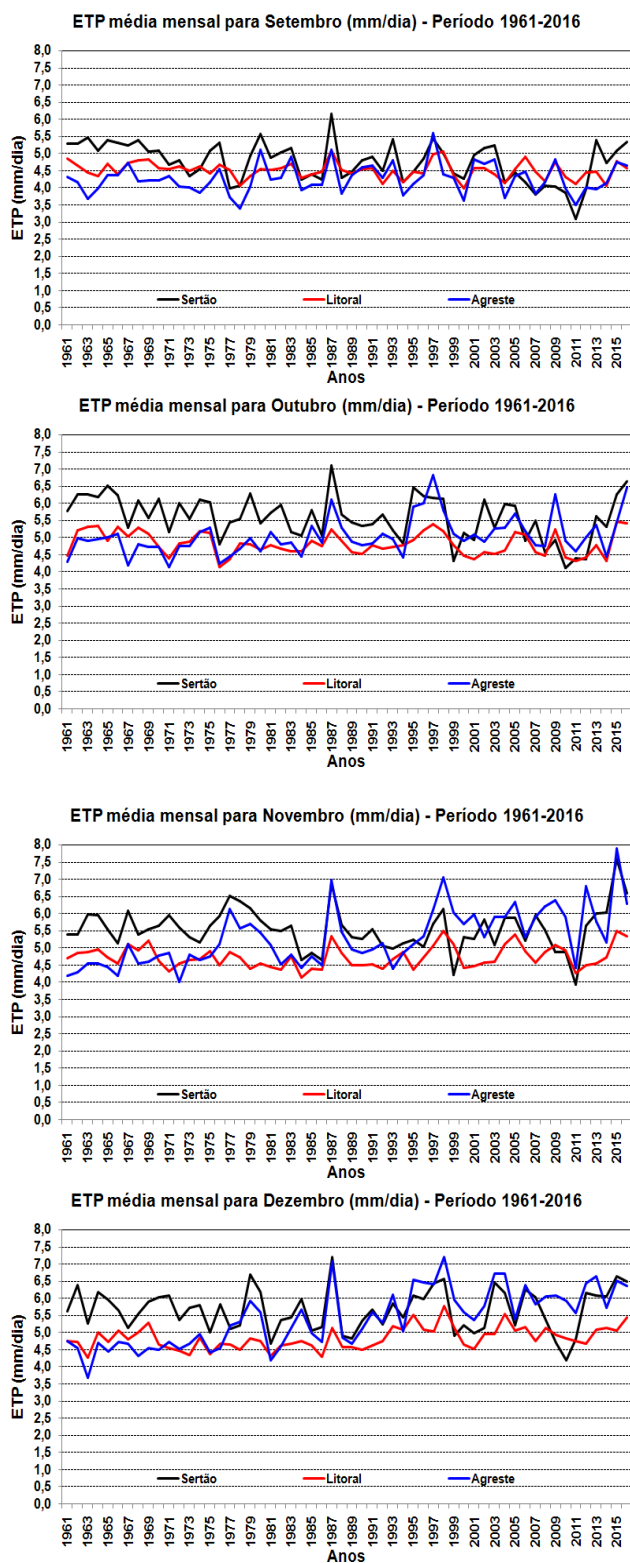


Figura 3. Variabilidade mensal da ETP (mm/dia) no período 1961-2019 para as mesorregiões do sertão, agreste e litoral de Alagoas.

Desvios e Tendências Lineares da ETP

A Figura 4 mostra a variação da ETP e os respectivos desvios padronizados com retas de tendência linear para o trimestre representativo do

verão. No verão as médias diárias de ETP variam de 5,75mm/dia no sertão, 5,54mm/dia no agreste e 4,93mm/dia no litoral. No sertão não há tendência, enquanto há tendências positivas com extrema

significância estatística (p -valor $\leq 0,01$) no agreste, com correlação de moderada a forte ($r=0,72$), e com alta significância estatística significativa no litoral ($0,01 < p$ -valor $\leq 0,05$). A Figura 5 mostra que o mesmo ocorre para o outono, ausência de tendência para o sertão e extrema significância estatística na tendência positiva do agreste. A tendência positiva observada para o litoral não possui significância estatística. No outono os valores médios diários da ETP decaem no sertão e agreste em relação ao verão, para 5,23mm/dia e 5,01mm/dia, enquanto no litoral permanece quase inalterada com valor de 4,98mm/dia.

A Figura 6 ressalta as condições observadas no inverno, período com menores valores da ETP média diária, com valores de 4,22mm/dia, 4,04mm/dia e 4,54mm/dia no sertão, agreste e litoral. Devido a menor amplitude térmica no litoral no inverno esta região supera as demais nos valores diários da ETP. O fator em

comum entre as regiões são as tendências negativas com extrema significância estatística em maiores intensidades no sertão e litoral, com valores de correlação iguais a 0,80 e 0,71, evidenciando o acentuado declive da reta de tendência. No agreste o declive é menos acentuado com correlação igual a 0,52, no entanto também extremamente significativa.

Por fim a Figura 7 mostra a situação da primavera, época de retomada das altas temperaturas em todo o Estado, com valores de ETP da ordem de 5,48mm/dia, 5,03mm/dia e 4,85mm/dia no sertão, agreste e litoral. Nesta estação as três regiões possuem condições distintas, no sertão mantém-se a tendência negativa com alta significância estatística (p -valor = 0,018 e $r=0,32$), tendência positiva no agreste com extrema significância estatística (p -valor $\leq 0,01$ e $r = 0,57$), e litoral com leve tendência negativa sem significância estatística.

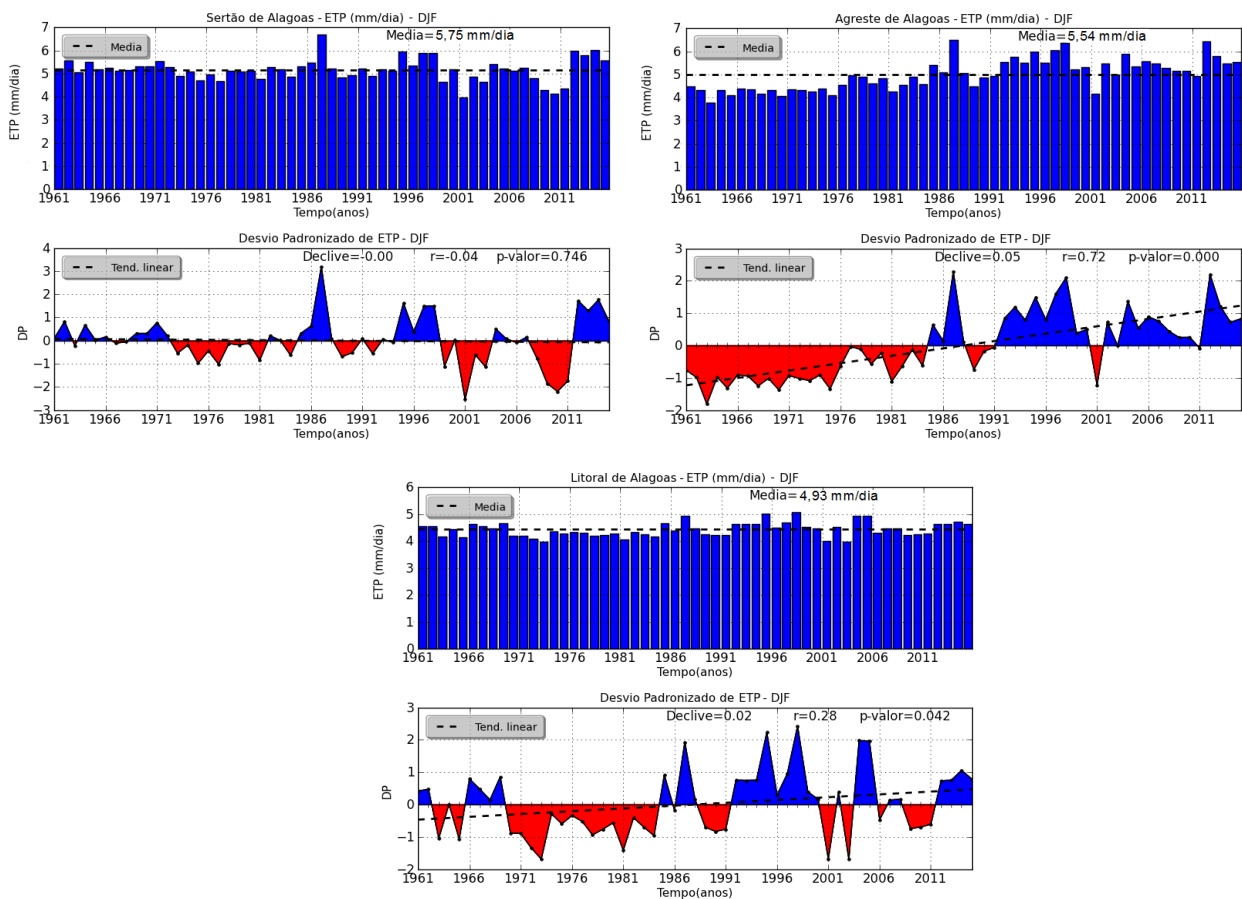


Figura 4. Nos gráficos superiores, variação da ETP e respectiva linha que representa o valor médio. Nos gráficos inferiores, desvio padronizado com a linha de tendência e parâmetros estatísticos da reta em relação ao tempo (declive, r e p-valor para a significância estatística da inclinação da reta). Os dados são relativos ao trimestre DJF (Verão).

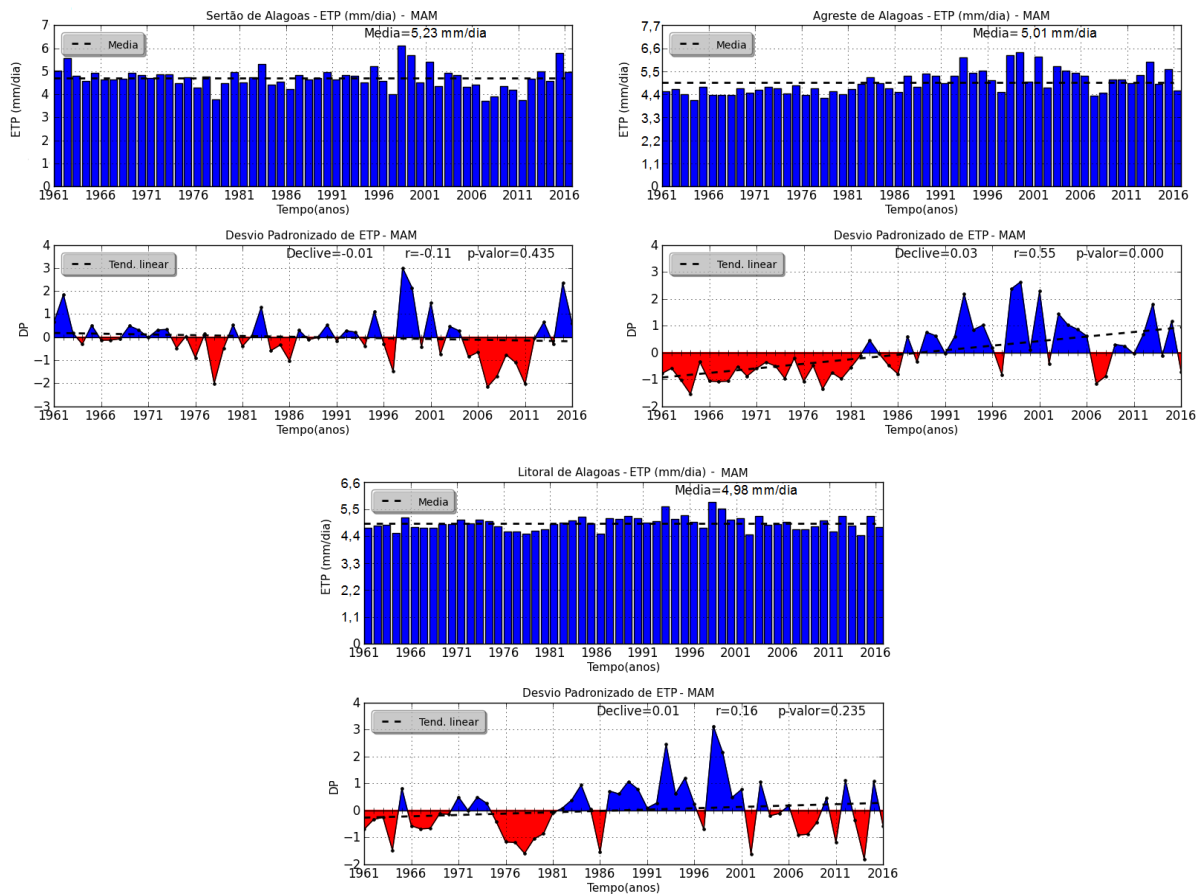
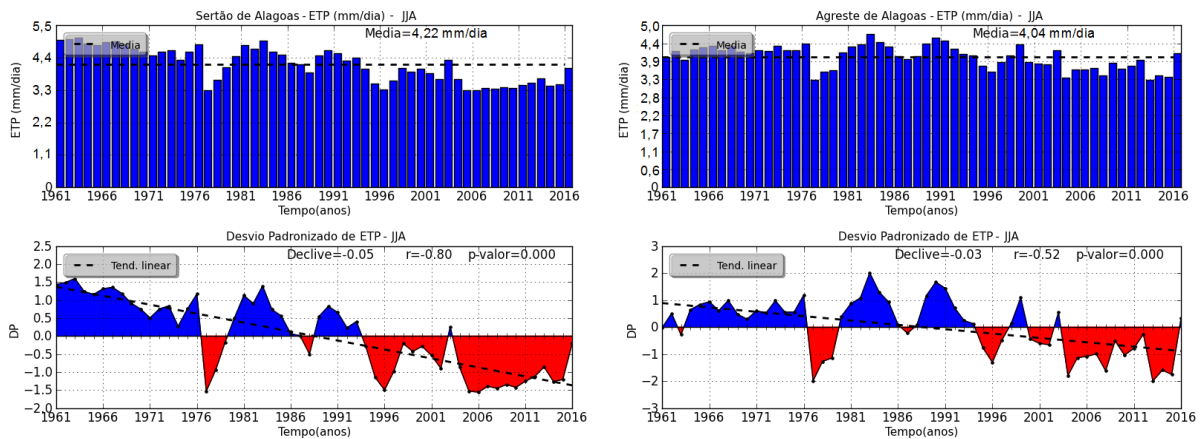


Figura 5. O mesmo da Figura 4, só que para o trimestre MAM (outono).



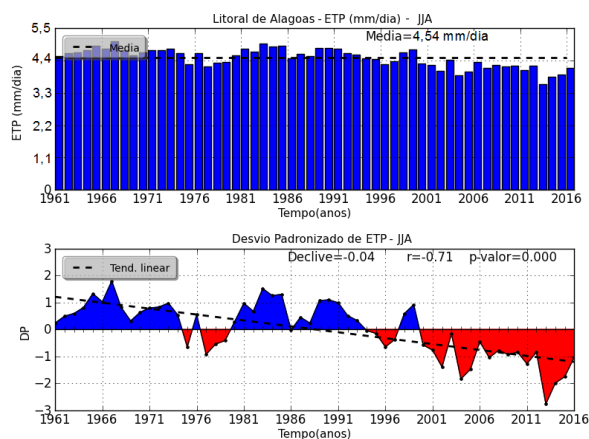


Figura 6. O mesmo da Figura 4, só que para o trimestre JJA (inverno).

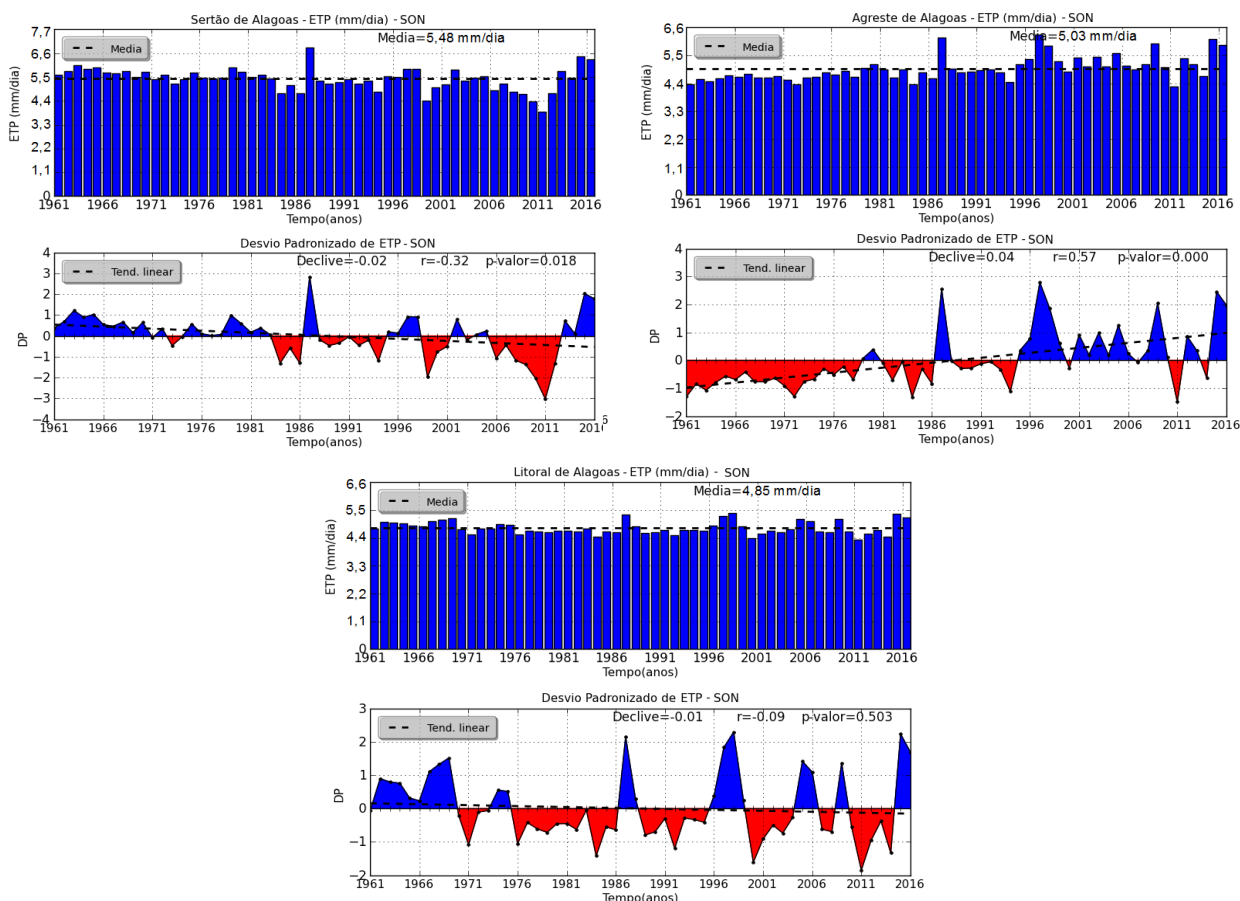


Figura 7. O mesmo da Figura 4, só que para o trimestre SON (primavera).

Teste Sequencial de MK para a ETP

O teste sequencial de MK foi aplicado a fim de validar as tendências observadas via regressão linear. Na Figura 8, para o verão, nota-se a falta de significância estatística para a série relativa ao sertão, com alto p-valor associado ao baixo valor do coeficiente Kendall- τ , equivalente a correlação de Pearson para a regressão linear. A tendência para a série do agreste, positiva e de extrema significância estatística corrobora o resultado obtido com a regressão linear, com valor Kendall- $\tau = 0,54$. Para o agreste o teste ainda evidencia que as curvas direta U_i e retrógrada U'_i , se cruzam fora dos limites de

confiança, evidenciando o início da década de 80 como o ponto provável do início das mudanças, com o crescimento dos valores da ETP a partir de então. Por ser mais rigoroso do que a regressão linear, percebe-se a tendência do litoral, que apresentou significância ao nível de 95% na análise dos mínimos quadrados, no limiar exato da significância estatística, trazendo dúvidas na assertiva de que existiria tendência positiva e significante também no litoral.

Na Figura 9, para o outono, há ausência de tendência para o sertão, e positiva e com extrema significância estatística no agreste, caracterizada a partir

do final da década de 70. No litoral a curva direta U_i sai dos limites de confiança no início da década de 80 retornando no início da década de 90, evidenciando uma quebra de patamar neste período. O DP da Figura 5 para o litoral mostrou que estes foram anos atípicos dentro da série, pela predominância de desvios positivos, ou aumento dos valores médios diários da ETP.

O teste de MK para o inverno, na Figura 10, confirma os desvios negativos, com tendências significativas de declínio da ETP média diária entre o início e o fim da série de dados, com p-valor $\leq 0,01$ nas três regiões e valores elevados do coeficiente Kendall- τ , 0,61, 0,34 e 0,49 para sertão, agreste e litoral em sequência. Para o sertão o teste mostra que a tendência se inicia de forma consistente no início da década de 80 (1983-1984), no agreste ocorre no final da década de 90

(1997-1998), e no litoral em meados da década de 90 (1995-1996).

Para a primavera, trimestre SON, Figura 11, o teste de MK afirma a tendência de diminuição da ETP média diária no sertão, com valor Kendall- τ igual a 0,28 (p-valor $\leq 0,01$), a partir do ano de 1976. Também é confirmada a tendência de aumento no agreste, com extrema significância estatística, a partir do final da década de 70. No litoral uma pequena quebra de patamar é observada no início da década de 70, que pôde-se observado nos desvios padronizados da Figura 7, marcando uma alternância entre anos com valores médios diários de ETP acima da média, do início da série até o início da década de 70, invertendo-se a situação durante aproximadamente 10 anos com predomínio de ETP abaixo da média, entre 1976 a 1986.

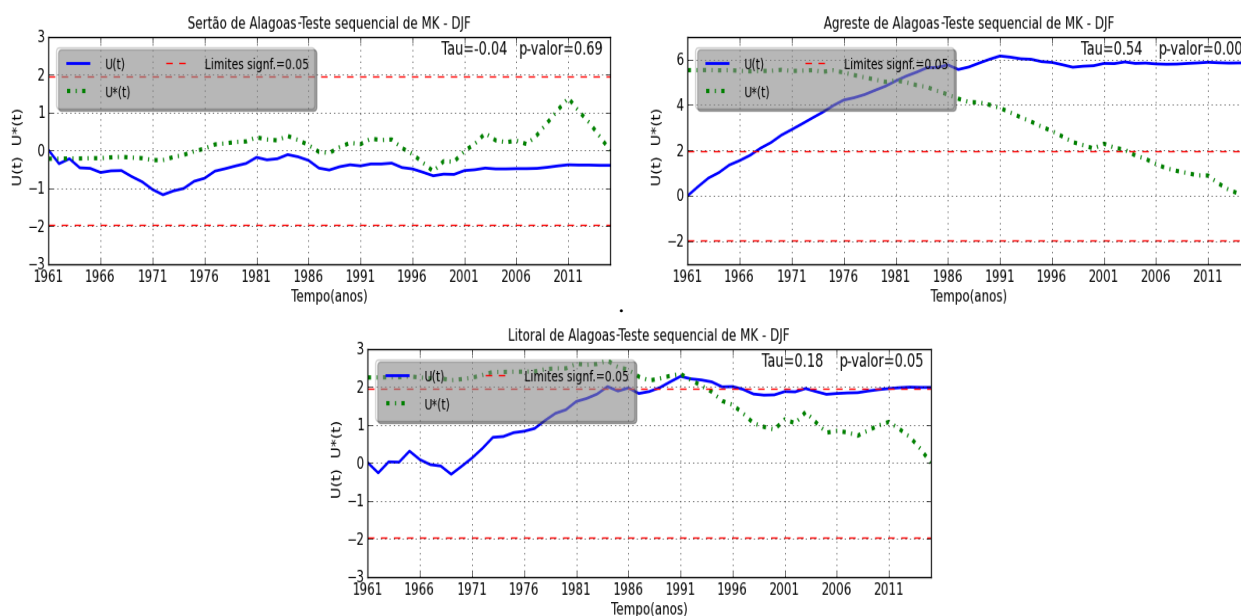


Figura 8. Gráficos do teste sequencial de MK para o trimestre DJF (Verão) no sertão, agreste e litoral alagoanos, respectivamente.

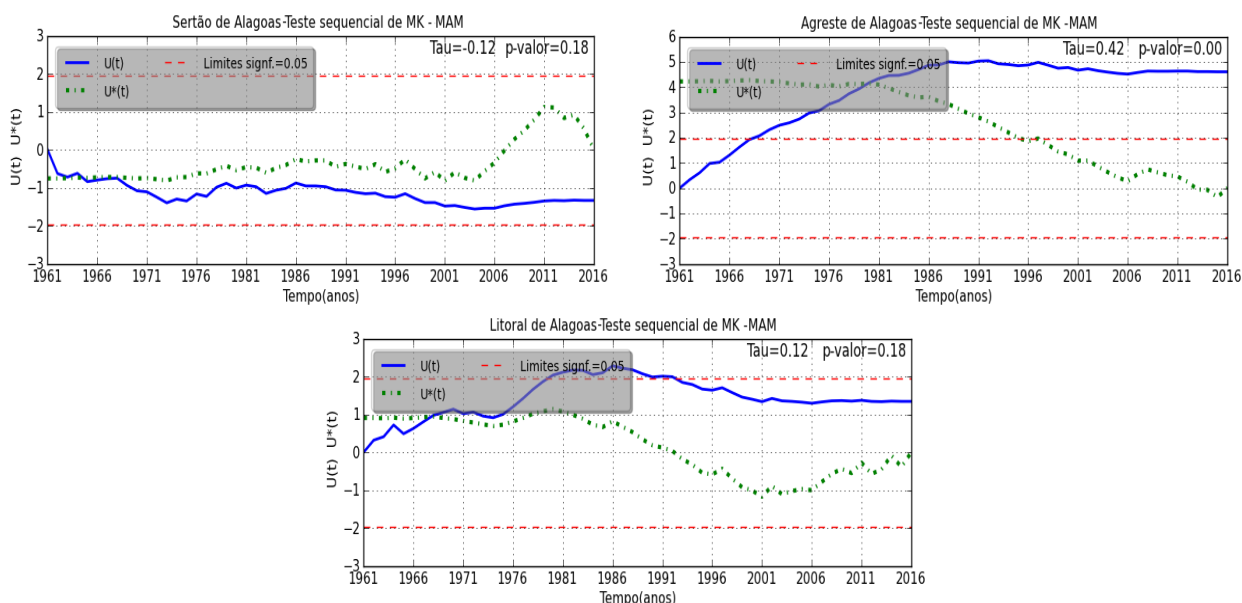


Figura 9. O mesmo da Figura 8, só que para o trimestre MAM (outono).

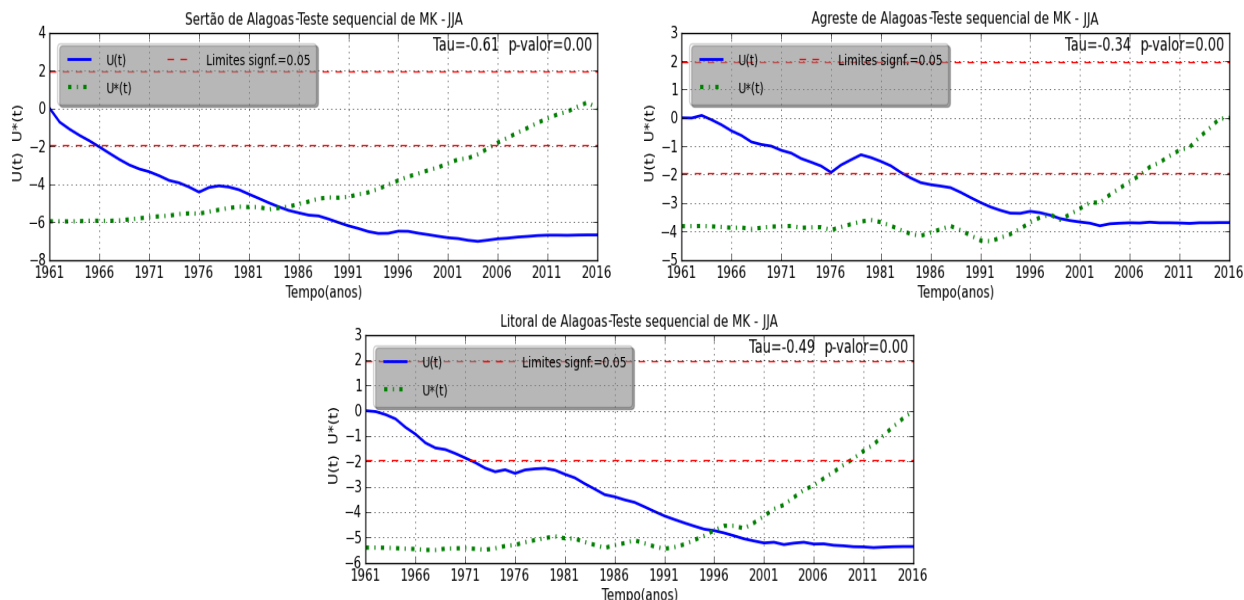


Figura 10. O mesmo da Figura 8, só que para o trimestre JJA (inverno).

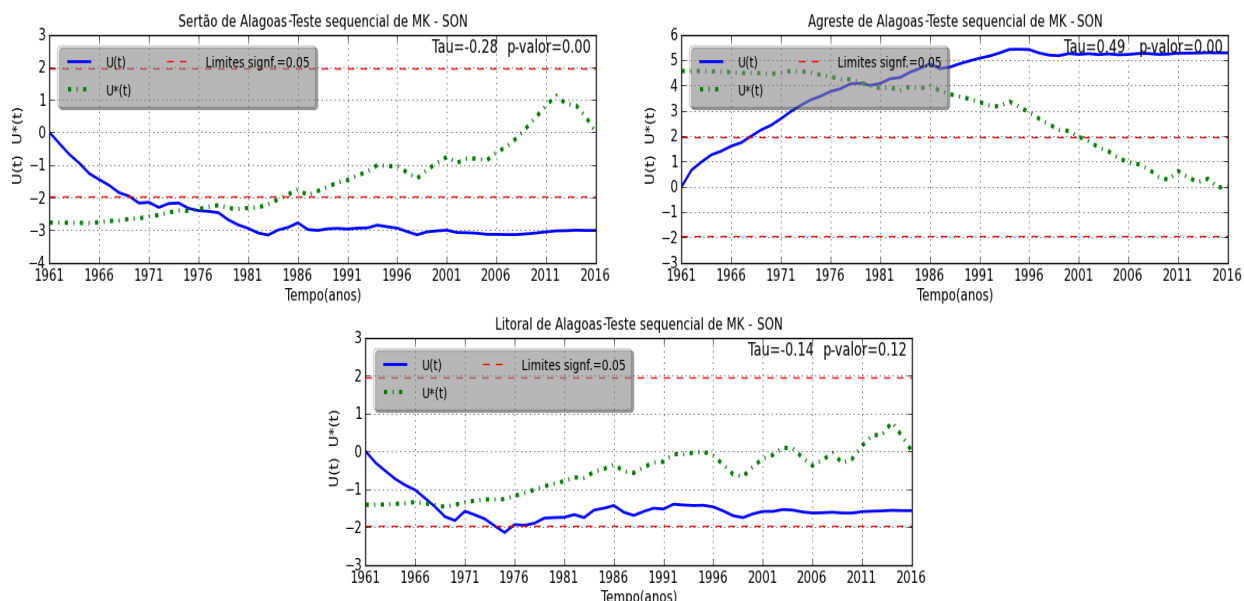


Figura 11. O mesmo da Figura 8, só que para o trimestre SON (primavera).

Análise Anual da ETP

Os resultados obtidos via análise da disposição mensal da ETP durante o período de análise, dos desvios padronizados e teste sequencial de MK durante os períodos sazonais demonstraram que as mesorregiões do Estado de Alagoas não apresentam um comportamento homogêneo quando se trata das tendências observadas para a ETP. No sertão, a nível sazonal, não foram observadas tendências estatisticamente significativas do ponto de vista dos desvios padronizados e com o teste de MK no verão, outono e primavera, apenas no inverno. No entanto predominou mesmo nos trimestres sem tendência significativa uma convergência no sentido da diminuição dos valores da ETP média diária no período

1961-2016. Esta característica é mostrada no Figura 12. O declive acentuado, influenciado pelos baixos valores de 2006 a 2011, acarretou em tendência negativa estatisticamente significativa ao nível de 99%, via regressão linear e teste de MK ($r = 0,42$ e $Kendall-\tau = 0,47$).

Situação contrária é observada no agreste, com clara tendência de aumento e elevados valores de r e $Kendall-\tau$ ($0,67$ e $0,55$), onde se pode constatar duas situações distintas, do início da série até o final da década de 70, os valores da ETP média diária eram da ordem de 4,5mm/dia, e do início da década de 80 até 2016, estes valores se elevam ao patamar médio de 5,0mm/dia. A região mais homogênea é a litorânea, com

leve inclinação negativa, mas sem apresentar a nível anual tendências estatisticamente significativas.

Estes resultados opostos verificados nas mesorregiões do Estado de Alagoas evidenciam a importância de se pesquisar de forma mais aprofundada a real influência real das duas principais componentes que constituem a medida de ETP pelo método de PM, a radiativa e a aerodinâmica. Não obstante, estudos a nível global divergem sobre qual das duas afetam mais as tendências de ETP. Wang et al., (2012) mostraram em suas análises que a componente aerodinâmica da ETP era responsável por 86% das mudanças desta variável entre 1973 a 2008, no entanto Matsoukas et al., (2011) analisando fluxo de radiação obtidos por satélites e dados de reanálises de variáveis meteorológicas concluíram o oposto, que as tendências da ETP seguiam em maior proximidade as tendências da disponibilidade de energia do que das tendências relacionadas a transferência de vapor relacionadas a umidade e ao vento.

Desta forma, faz-se necessário analisar as tendências de cada parâmetro meteorológico presente na equação de PM a fim de identificar a real causa de determinada região experimentar declínio e as regiões vizinhas incremento ou permanecerem neutras. Nas diferentes regiões do globo autores tentam encontrar as razões para as tendências encontradas, Kitsara et al., (2013) mostraram haver estreita concordância entre as mudanças da ETP e a insolação. Golubev et al., (2001) sugeriu a hipótese de que o teor de água no solo influencia diretamente no déficit de saturação de vapor, causando importante variabilidade dos valores da ETP. Já McVicar et al., (2012) por meio da revisão de 148 estudos para diferentes locais do Planeta mostrou que tendências de redução da velocidade do vento seriam a causa da diminuição dos valores globais da ETP.

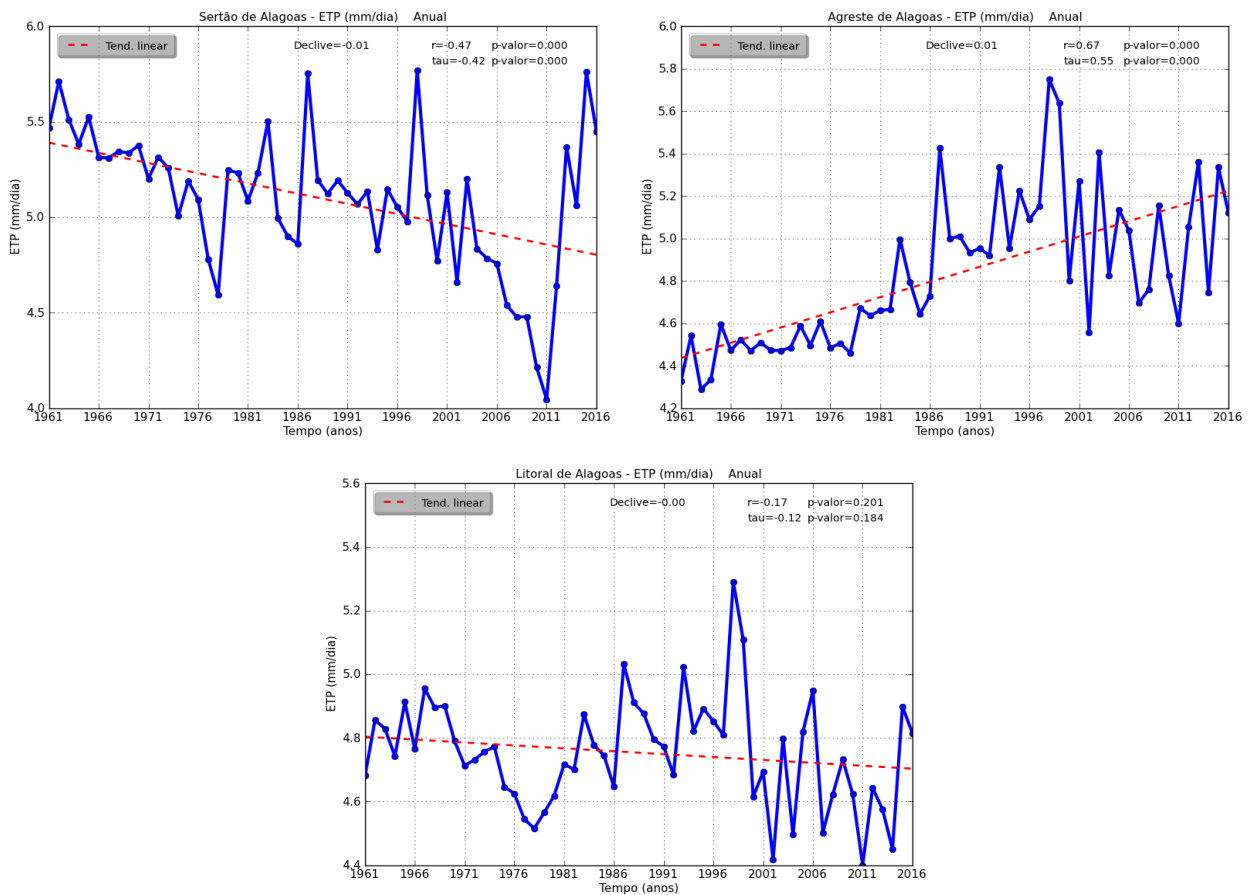


Figura 12. Variabilidade anual da ETP média diária nas mesorregiões do sertão, agreste e litoral de Alagoas.

Conclusões

1) Em Alagoas a ETP média diária apresenta seus maiores valores no sertão, seguidos do agreste e litoral. Nas três mesorregiões o período de máximos valores ocorre de outubro a março com picos em fevereiro e março, e o de mínimos valores de abril a setembro com picos em junho e julho.

2) A nível mensal os valores de ETP apresentaram de 1961 a 2016 incremento positivo no período mais quente do ano no Estado entre outubro e abril, principalmente no agreste.

3) A nível sazonal, no verão observou-se tendências positivas e estatisticamente significativas, por regressão linear e teste de MK, apenas para o agreste, assim como no outono, a partir da década de 80.

O inverno é a única estação onde as três regiões apresentam a mesma tendência, negativa, e com significância estatística. Na primavera o sertão apresenta tendência de decréscimo dos valores diários da ETP, estatisticamente significativa, o agreste tendência de aumento, também com significância pelos dois métodos de análise, e o litoral apresenta tendência negativa, mas sem significância.

4) Na síntese anual, percebe-se tendências estatisticamente significantes de decréscimo da ETP média diária no sertão, de aumento no agreste, e neutralidade no litoral.

Referências

- Allen, R.G.M., Pereira, L.S., Perrier, A., 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration, *ICID Bull* 43, 35-92.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Abtew, W., Obeysekera, J., Iricanin, N., 2011. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida. *Hydrological Processes* 25, 958-969.
- Darshana, A., Pandey, R., Pandey, P., 2013. Analysing trends in reference evapotranspiration and weather variables in the Tons River Basin in Central India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 27, 1407-1421.
- Fan, Z., Thomas, A., 2013. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961–2004, *Climatic Change* 116, 309-325.
- Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, G., Haylock, M., Klein Tank, A.M.G., Peterson, T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the century. *Climate Research* 19, 193-212.
- Golubev, V.S., Lawrimore, J.H., Groisman, P.Y., Speranskaya, N.A., Zhuravin, S.A., Menne, M.J., Peterson, T.C., Malone, R.W., 2001. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment, *Geophysical Research Letters* 28, 2665-2668.
- Gomez, R.A.Q., 1999. Trends of Maximum and Minimum Temperatures in Northern South America. *Journal of Climate* 16, 2104-2112.
- Itenfisu D., Elliott, R.L., Allen, R.G., Walter, I.A., 2000. Comparison of reference evapotranspiration calculations across a range of climates, in *Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium*, 216-227, ASAE, Phoenix, Arizona.
- Kendall, M.G., 1955. *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London, U.K.
- Kitsara, G., Papaioannou, G., Papathanasiou, A., Retalis, A., 2013. Dimming/brightening in Athens: Trends in sunshine duration, cloud cover and reference evapotranspiration. *Water Resources Management* 27, 1623-1633.
- Lopez-Urrea, R., Martin de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, *Agricultural Water Management* 85, 15-26.
- Machiwal, D., Jha, M.K., 2008. Comparative Evaluation of Statistical Tests for Time Series Analysis: Application to Hydrological Time Series. *Hydrological Sciences Journal* 53, 353-366.
- Marengo, J. A., 2007. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização para o clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. *Ministério do Meio Ambiente*, 2 ed. Brasília.
- Matsoukas, C., Benas, N., Hatzianastassiou, N., Pavlakis, K. G., Kanakidou, M., Vardavas, I., 2011. Potential evaporation trends over land between 1983–2008: Driven by radiative fluxes or vapour-pressure deficit? *Atmospheric Chemistry Physical* 11, 7601-7616.
- Mcvicar, T.R. et al., 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation, *Journal of Hydrology* 416–417, 182-205.
- Nóbrega, R.S., Farias, R.F.L., Santos, C.A.C., 2015. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia* 30, 171-180.
- Onoz, B., Bayazit, M., 2003. The Power of Statistical Tests for Trend Detection. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 27, 247-251.
- Santos, C.A.C., Brito, J.I.B., 2007. Análise dos índices de extremos para o semiárido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. *Revista Brasileira de Meteorologia* 22, 303-312.
- Santos, C.A.C., Brito, J.I.B., Rao, T.V.R., Meneses, E.A., 2009. Tendências dos Índices de precipitação no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 39-47.
- Silva, M.T., Silva, V.P.R., Azevedo, P.V., 2012. O cultivo do algodão herbáceo no sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil, no cenário de mudanças climática. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 80-91.
- Some'e, B.S., Ezani, A., Tabari, H., 2013. Spatiotemporal trends of aridity index in arid and semi-arid regions of Iran. *Theoretical Applied of Climatology* 111, 149-160.
- Sneyers, R., 1975. *Sur L'analyse Statistique des Series D'observations*. Gênevè: Organisation Météorologique Mondiale, OMM 143, 192.
- Ventura, F., Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations, *Irrigation Science* 18, 163-170.
- Vicente-Serrano, S.M., Molina, C.A., Lorenzo, A.S., Revuelto, J. et al., 2014. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961–2011). *Water Resources Research* 50, 8458-8480.

- Wang, W., Shao, Q., Peng, S., Xing, W., Yang, T., Luo, Y., Yong, B., Xu, J., 2012. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957–2008 and their spatial and seasonal differences, *Water Resources Research*, 48.
- Walter I.A., et al., 2000. ASCE standardized reference evapotranspiration equation, in *Proceedings National Irrigation Symposium*, edited by R.G. Evans, B. L. Benham, and T. P. Trooien, 209-215, ASAE, Phoenix.
- Zuo, D., Xu, Z., Yang, H., Liu, X., 2012. Spatiotemporal variations and abrupt changes of potential evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Wei River basin, China, *Hydrological Processes* 26, 1149-1160.
- Zhang, X., Yang, F., 2004. *RCLimDex (1.0) User Guide*. Climate Research Branch Environment Canada. Downsview, Ontario-Canada.
- Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F., Kenyon, J., 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile based indices of temperature extremes. *Journal of Climate* 18, 1641-1651.