



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PEDRO ROCHA DE OLIVEIRA FILHO

**TENDÊNCIAS DE MUDANÇA EM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RECIFE – PE**

Recife
2019

PEDRO ROCHA DE OLIVEIRA FILHO

**TENDÊNCIAS DE MUDANÇA EM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RECIFE – PE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

O48t Oliveira Filho, Pedro Rocha de.
Tendências de mudança em variáveis climáticas e evapotranspiração de referência em Recife – PE / Pedro Rocha de Oliveira Filho. – 2019.
46 folhas, il., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia civil. 2. Mudanças climáticas. 3. Recursos hídricos. 4. Tendências temporais. 5. Variáveis meteorológicas. I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima. (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.). BCTG/2019-216



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO(S): PEDRO ROCHA DE OLIVEIRA FILHO

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Profa. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Examinador 1: Profa. Leijdane Maria Maciel de Oliveira

Examinador 2: Diogo Francisco Borba Rodrigues

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: TENDÊNCIAS DE MUDANÇA EM VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RECIFE – PE

LOCAL:

DATA: 31/05/2019 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 9:00 AM.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____ (deixar ‘Exame Final’, quando for o caso).

1) () **aprovado(s) (nota > = 7,0)**, pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () **reprovado(s). (nota <3,0)**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 31 de maio de 2019

Orientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato 1:

Candidato 2:

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.
Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois sem Sua presença na minha vida este trabalho não seria possível.

À minha orientadora e professora, Dra. Suzana Montenegro por todo seu apoio, orientação e incentivo ao longo do trabalho.

À professora Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira por seu apoio em momentos difíceis do trabalho, se tornou uma peça essencial para o desenvolvimento do mesmo.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelas oportunidades que me foram apresentadas ao longo do período de estudo

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de projetos de pesquisa (Chamada Universal - MCTI/CNPq Nº 14/2014 / processo CNPq 448236/2014-1 e MCTI/CNPq/ANA N.23/2015 / processo CNPq 446254/2015-0).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida na realização da minha iniciação científica, onde tive oportunidade de escrever e publicar diversos artigos.

Aos amigos da que fiz ao longo da graduação e principalmente à Diogo, Bruno e Ana, não há como expressar em palavras a gratidão que eu tenho em relação ao apoio que vocês me deram ao longo da realização deste trabalho.

À minha mãe, Dinancy, por todo incentivo, amor, atenção e apoio que me proporcionou durante minha vida inteira.

*“As falhas dos homens eternizam-se no bronze,
As suas virtudes escrevemos na água.”*

- William Shakespeare

RESUMO

É irrefutável a grande importância que as mudanças climáticas têm sobre as regiões do Nordeste brasileiro, visto que as variações no clima afetam diretamente os elementos dos recursos hídricos – como a demanda de água. Com o objetivo de verificar e avaliar esses impactos gerados pelas mudanças climáticas, foi utilizada uma série de dados contendo os valores mensais de temperaturas máximas diárias, temperaturas mínimas diárias, velocidade do vento média, umidade relativa média e precipitação entre 1965 e 2017 em estação referente à cidade de Recife. Utilizaram-se esses dados para a determinação da evapotranspiração de referência (ET_0), e para a realizar análises de tendências para as variáveis climáticas em escala mensal, anual e sazonal. Em relação à evapotranspiração foi utilizado o método de Penman-Monteith da FAO para sua determinação, já as significâncias estatísticas das tendências estudadas foram avaliadas pelo teste não-paramétrico de Mann-Kendall – o qual se mostrou eficaz para a realização da análise destas tendências, na cidade em questão – e as taxas de variação pelo método de regressão linear. A evapotranspiração diária média durante o período estudado variou entre $2,30 \text{ mm. dia}^{-1}$ e $6,63 \text{ mm. dia}^{-1}$; foi visto na velocidade do vento uma forte tendência de queda ao longo dos anos com alta significância; em relação às temperaturas foi observado um comportamento anômalo entre 2004 e 2005, causando uma tendência de queda sutil para a temperatura máxima durante o período, mas analisando 1965 a 2004 e 2005 a 2017 separadamente pode-se observar uma tendência de aumento nessas séries, somado com o leve aumento visto nos valores de temperatura mínimas fica verificado a ocorrência de um aquecimento no período estudado; A umidade relativa apresentou tendência decrescente no tempo do estudo, com alguns meses de baixa significância e um com nenhuma. Para a evapotranspiração só dois meses apresentaram significância estatística tornando a série não significativa estatisticamente para a análise de tendência, visto que só foram vistas tendências em uma estação.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Recursos Hídricos. Tendências temporais. Variáveis meteorológicas.

ABSTRACT

It is irrefutable the great importance that climate change has on the regions of northeastern Brazil, since climate variations directly affect the elements of water resources - such as the demand for water. In order to verify and evaluate these impacts generated by climate change, a series of data containing monthly values of maximum daily temperatures, minimum daily temperatures, average wind speed, average relative humidity and precipitation between 1965 and 2017 in a station referring to the city of Recife were used to determine the reference evapotranspiration (ET_o) and to perform trend analyses for climate variables on a monthly, annual and seasonal scale. For the evapotranspiration, the FAO Penman-Monteith method was used for its determination, while the statistical significance of the studied trends was evaluated by the non-parametric Mann-Kendall test – which proved to be effective for the analysis of these trends in the studied city – and the rates of variation by the linear regression method. The mean daily evapotranspiration during the studied period varied between 2.30 mm and 6.63 mm; a strong downward trend over the years was seen for the wind speed with high significance; About the temperatures, an anomalous behavior was observed between 2004 and 2005, causing a subtle downward tendency for the maximum temperature during the period, but analyzing 1965 to 2004 and 2005 to 2017 separately one can observe an increasing tendency in these series, added to the slight increase seen in the minimum temperature values, the occurrence of a warming in the studied period is verified; the relative humidity presented a decreasing tendency in the study time, with some months of low significance and one with none. For the evapotranspiration only two months were of some statistical significance making the series not statistically significant for the trend analysis, since trends were only seen in one season.

Keywords: Climate change. RH. Temporal trends. Meteorological variables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estado de Pernambuco com demarcação da região estudada (Recife)	21
Figura 2 –	Valores médios mensais de ET_o diária, T_{min} e T_{max} entre 1965 e 2017	30
Figura 3 –	Série temporal e tendência detectada para a média anual de velocidade do vento entre 1965 e 2017	31
Figura 4 –	Série temporal e tendência detectada para a média anual de temperatura máxima entre 1965 e 2017	33
Figura 5 –	Série temporal e tendência detectada para a média anual de temperatura mínima entre 1965 e 2017	33
Figura 6 –	Série temporal e tendência detectada para a média anual de umidade relativa média entre 1965 e 2017	36
Figura 7 –	Série temporal e tendência detectada para a média anual da evapotranspiração de referência entre 1965 e 2017	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Quantidade de dados mensais válidos para cada variável meteorológica	27
Tabela 2 –	Valores médios e desvios padrão de cada variável meteorológica	28
Tabela 3 –	Quantidade de dados de ET_o sem falhas para cada mês do ano	28
Tabela 4 –	Valores médios e desvios padrão da ET_o diária entre 1965 e 2017	29
Tabela 5 –	Tendências de variação encontradas para as variáveis meteorológicas entre 1965 e 2017	30
Tabela 6 –	TMK e tendências de variação encontradas para a ET_o diária entre 1965 e 2017 com indicação nível de significância em escala mensal	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Justificativa e motivação.....	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Evapotranspiração.....	15
2.2	Evapotranspiração de referência.....	16
2.3	Mudança climática / análise de tendência.....	17
2.3.1	Variáveis Meteorológicas.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	Área de Estudo.....	21
3.2	Coleta de dados.....	22
3.3	Processamento dos dados.....	22
3.4	Método de Penman-Monteith-FAO.....	23
3.5	Teste de Mann-Kendall.....	24
3.6	Regressão Linear.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1	Análise dos Resultados.....	27
4.2	Estimativa de evapotranspiração de referência.....	28
4.3	Análise de tendências.....	30
4.3.1	Velocidade do vento.....	31
4.3.2	Temperatura.....	32
4.3.3	Umidade relativa média.....	36
4.3.4	Evapotranspiração de referência.....	38
4.4	Considerações finais.....	40
5	CONCLUSÕES.....	41
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Os impactos causados por mudanças climáticas ao longo dos anos e ao redor do globo vêm se mostrando cada vez mais intensos, trazendo assim uma necessidade de adaptação à essas mudanças, para reduzir o impacto causado pelas mesmas, principalmente em regiões críticas do globo. Para isso aplicam-se alguns estudos nas tendências de variação temporal e espacial, visando identificar os problemas para assim ser possível se tomar medidas adaptativas a respeito dos mesmos. Mas primeiramente é necessário definir o conceito de “Mudança Climática”.

Segundo o AR 5 (IPCC, 2014) pode-se definir mudança climática como uma alteração no estado do clima a qual é possível se identificar através de alterações na média e/ou variabilidade nas suas propriedades, e que também se mostra presente por um longo período de tempo (décadas ou mais). Essas mudanças podem vir de fatores naturais (internos), como erupções vulcânicas, ou fatores antrópicos (externos), como emissão de gases nocivos na atmosfera ou substâncias tóxicas no solo.

Dessa forma pode-se afirmar que mudanças climáticas são alterações nas propriedades climáticas, sendo essas as variáveis hidrometeorológicas utilizadas no estudo, em um determinado período de tempo. Se torna necessário esta definição pois não se estudará apenas as mudanças ocasionadas por atividades humanas.

Com o passar do tempo os impactos gerados pela mudança climática em atividades e/ou processos naturais e não naturais, sendo esta última as realizadas pelo homem, vêm se tornando mais evidentes. E devido à essa problemática a Organização Meteorológica Mundial (OMM) juntamente com a UNEP (United Nations Environment Programme) criaram o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) em 1988 (DELGADO et al., 2004). Segundo o quinto relatório de avaliação climática do IPCC (AR5), divulgado em 2014, observou-se que entre a média do período de 1850-1900 e do período de referência AR5 (1986-2005) houve uma variação de 0,61°C na temperatura global. As últimas décadas vêm sendo cada vez mais quentes de forma que foi evidenciado um aumento de até 3°C em determinadas regiões do globo durante o período de 1901 2012, aumento o qual acarreta sérios problemas relacionados com o ecossistema e economia da região (IPCC, 2014). A possibilidade de mudança no clima terrestre afeta diretamente os componentes do ciclo hidrológico de ecossistemas terrestres e dessa forma a

disponibilidade dos recursos hídricos, contribuindo assim para um aumento nas incertezas em relação à demanda e oferta de água (STRECK, 2006).

Mudanças climáticas também podem ser causa de alterações na precipitação e padrões de temperatura, dessa forma alterando a evapotranspiração (ET), a mudança climática pode também alterar significativamente a qualidade e quantidade de água em bacias hidrográficas (USEPA, 2014). Um aumento na temperatura global aumenta a capacidade de retenção de água na atmosfera, resultando em um aumento da evapotranspiração e precipitação (HOWDEN et al., 2007).

Em relação aos impactos sobre os processos hidrometeorológicos no Nordeste brasileiro e em Pernambuco é possível observar a existência de diversos estudos, que falam sobre a importância desses impactos (NOBRE, 2011; SILVA, 2013; SOUZA & AZEVEDO, 2012; SANTOS, SANTOS & COUTINHO, 2013; SANTOS, ASSIS & SOUZA, 2014; LACERDA et al., 2009;), que apresentam tendências de variação na temperatura, na oferta hídrica e nos totais anuais de precipitação.

As mudanças no clima podem ocorrer devido a variabilidade natural ou antropogênica interna ou externa ao sistema climático. A variabilidade natural pode ser expressa pela radiação solar, por exemplo (TUCCI, 2002). Com isso em mente, a importância da análise de tendência para as variáveis meteorológicas se torna evidente para um melhor entendimento da mudança climática e dos possíveis impactos gerados pela mesma em determinadas regiões. Também fica claro a importância do planejamento e gestão dos recursos hídricos para atender aos vários interesses frente aos impactos decorrentes dessas mudanças climáticas, diversos relatórios de órgãos internacionais sugerem estratégias e disseminam conhecimentos diretamente relacionados ao tema em questão.

Sabendo que o clima apresenta variabilidade temporal e espacial decorrentes de processos na atmosfera, no solo e em sua cobertura, nos oceanos e devido à radiação solar. Podemos dizer que os processos envolvidos nessa variação são não-lineares e além disso estão fortemente interligados, causando dificuldade na sua estimativa (TUCCI, 2002). Dessa forma pode-se verificar o quão importante é a precisão na determinação da evapotranspiração e da sua variabilidade espacial no âmbito de análise, entendimento e projeção dos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos (IRMAK et al., 2012; BLACKIE & SIMPSON, 1993). Devido à sua grande importância, tanto

econômica quanto social, o clima pode explicar parte do desenvolvimento da humanidade na terra, e isso pode ser visto através da observação das variáveis climáticas obtidas por meios indiretos (glaciologia e dendrohidrologia) além relatos históricos. É fato que as civilizações, inclusive nos dias de hoje, tiveram a sua sustentabilidade fortemente influenciada por períodos “anormais” do clima de alterações do uso do solo.

O entendimento das variações temporais e espaciais da ET_o se mostra um componente essencial para qualquer estudo hidrológico independente da região estudada, assim como para projetos, como o de sistemas de irrigação, por exemplo, e também para o planejamento dos recursos hídricos (RUSSO, 1983; DOLMAN, 1992; HUO et al., 2013).

Alguns dos estudos que avaliam essas tendências de variação da evapotranspiração com as mudanças climáticas têm mostrado resultados variados, podendo ser inclusive contrários aos comportamentos esperados (CHEN et al., 2005; RODERICK & FARQUHAR, 2002, 2004; MOONEN et al., 2002; HOBBS, RAMÍREZ & BROWN, 2004; LIU & ZENG, 2004; GRUNDSTEIN, 2009; ZHANG et al., 2007; GAO et al., 2007; GOLUBEV et al., 2001; LIU et al., 2004; PETERSON, 1995; BRUTSAERT & PARLANGE, 1998; THOMAS, 2000). Um dos motivos para a variação vista nos resultados se deve ao fato de que em alguns desses estudos se utilizaram equações empíricas baseadas fortemente em temperatura ou radiação solar, em boa parte devido a falha ou falta de dados, que não levam em conta alguns parâmetros climáticos críticos como velocidade do vento e o déficit de pressão de vapor, provavelmente fornecendo tendências e resultados que não representam com precisão o comportamento real da evapotranspiração.

1.1 Justificativa e motivação

De acordo com o que foi apresentado no tópico anterior, fica claro que em diversas regiões do globo os impactos das mudanças climáticas vêm se mostrando cada vez mais preocupantes sobre diversos setores, dentre estes encontra-se o dos Recursos Hídricos, e também fica claro que esses impactos se expressam de diferentes maneiras de acordo com as características particulares da região em questão. Em uma perspectiva mais local, tem-se que em Pernambuco, principalmente para habitantes de áreas críticas do estado (em relação à disponibilidade de água), há um maior risco de sofrerem os problemas relacionados com as mudanças climáticas, visto que a disponibilidade de água é um fator

que limita o desenvolvimento socioeconômico dessas regiões. Devido a isto foi estudado neste trabalho o comportamento das variáveis meteorológicas para a capital do estado.

Tendo em vista essa problemática, se torna necessário aplicar técnicas que objetivem minimizar a diferença de demanda e oferta de água, ou seja, atuem diretamente na problemática de disponibilidade de água, para que assim ocorra um ajuste que corresponda a essas alterações hidrometeorológicas. Obter o conhecimento do comportamento das diversas variáveis climáticas que regem o comportamento meteorológico da região, pode otimizar – de ponto de vista econômico, por exemplo – o desenvolvimento de possíveis projetos sobre esta problemática de disponibilidade de água. Ou seja, caso não haja o entendimento correto das variações e da quantificação correta dos componentes do ciclo hidrológico – onde a evapotranspiração costuma ser o mais importante – não é possível realizar esse ajuste da forma mais otimizada possível.

1.2 Objetivos

Neste tópico serão expostos os objetivos, gerais e individuais, que foram visados para o presente trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento temporal da evapotranspiração de referência e outras variáveis meteorológicas na região metropolitana de Recife-PE

1.2.2 Objetivos Específicos

- Calcular as médias sazonais e anuais de ET_0 em período de tempo representativo de possíveis mudanças climáticas para estações meteorológicas;
- Realizar o teste de Mann-Kendall, sazonal e anualmente, para verificar a significância das tendências para as variações da ET_0 e das variáveis meteorológicas que a influenciam;
- Quantificar a taxa de mudança dos parâmetros avaliados e determinar sua significância associando regressão linear com o teste de Mann-Kendall.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Devido ao grande embasamento científico do trabalho em questão, é importante se expor uma revisão da leitura e fundamentação teórica, visando um maior entendimento dos procedimentos que se foram realizados ao longo do trabalho.

2.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) segundo Carvalho et al. (2015) se mostra como a variável mais ativa no ciclo hidrológico e conseqüentemente se mostrando uma das principais variáveis na realização do balanço hídrico de uma região, se tornando assim um parâmetro crucial em qualquer estudo que a envolva. Allen et al. (1998) afirmaram que a evapotranspiração consiste de uma combinação de dois processos isolados, onde de um lado se tem a água perdida do solo por meio da evaporação, e do outro da vegetação por meio da transpiração.

Dessa forma, para o entendimento correto da ET precisa-se definir cada uma de suas componentes. Primeiramente a evaporação é o processo onde a água passa do estado líquido para o de vapor (vaporização) e conseqüentemente é retirada da superfície de evaporação. A água pode evaporar de diferentes tipos de superfícies como lagos, rios, pavimentos e solos molhados, assim como da vegetação superficialmente úmida. Já sobre a transpiração pode-se dizer que consiste da vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e a remoção do vapor para a atmosfera. Existem pequenas aberturas nas folhas das plantas por onde gases e vapor d'água passam. Quase toda a água é perdida através da transpiração sobrando apenas uma pequena fração que é de uso próprio da planta.

Para o cálculo da evapotranspiração existem métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são aqueles que geralmente se baseiam em fórmulas, que são combinações de diferentes elementos climáticos da área de estudo em questão. De acordo com Pereira et al. (1997) é possível estimar a evapotranspiração através de uma série de modelos, alguns deles são: Hargreaves (1977), Thornthwaite (1948) e radiação solar (DOORENBOS & PRUITT, 1977). Essas equações necessitam de correções para se adequar às regiões onde serão aplicadas, pois dependendo do clima da região elas podem apresentar épocas superestimadas ou subestimadas (MENDES, 2006). Em locais onde têm-se dados de temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa sugere-se o uso da equação de Penman, visto que proporciona resultados satisfatórios para

a avaliação de efeitos climáticos e por apresentar maior consistência nos resultados de maneira universal.

Como método direto pode-se citar o método direto do balanço hídrico, que se utiliza do princípio da conservação de massa para determinar taxas como por exemplo as de precipitação, escoamento superficial, irrigação e evapotranspiração (REICHARDT, 1985).

2.2 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_o) representa a evapotranspiração de uma superfície vegetal com todas suas características padronizadas, esse conceito foi inserido no estudo para poder ser feita a análise da demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo, desenvolvimento e práticas realizadas sob a vegetação (Allen et al., 1998). Dessa forma valores de ET_o medidos ou calculados em diferentes locais ou estações são comparáveis, já que se referem à mesma superfície de ET.

De acordo com Allen et al. (1998) os únicos fatores que afetam a ET_o são os parâmetros climáticos, como radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. E sabendo dos seus efeitos sobre as correntes atmosféricas, estes parâmetros podem ser fortemente impactados pelas mudanças de temperatura. O método mais adequado para o estudo em questão é a adaptação da FAO do Método de Penman-Monteith (PM), referido comumente por Método de Penman-Monteith-FAO (PM-FAO), este método foi selecionado para a determinação da ET_o por diversos motivos, dentre eles está o fato de ser baseado em características físicas da região e incorporar fatores fisiológicos e aerodinâmicos, se mostrando o mais preciso quando comparado com outros métodos, como já comentado anteriormente. Além disso também foram-se desenvolvidos processos para estimar parâmetros climáticos faltantes.

Mesmo sendo um método tão robusto e fisicamente baseado ainda há a ocorrência de muitas inconsistências nos resultados obtidos (SALVIANO, 2016), isso se dá ao fato da utilização de equações empíricas (como nas sugestões de correção na falta de parâmetros), que podem ocasionar essas incertezas já que não levam em conta uma parte dos parâmetros climáticos proveniente dos dados de determinada estação. Assim a maior causa para a inconsistência nos resultados se dá quando há ocorrência de falhas nos dados obtidos, podendo até invalidar certos resultados. Por motivos como os citados acima há uma necessidade de ajuste dos resultados durante a análise da tendência.

A estimativa precisa da ET_o na avaliação dos impactos que as mudanças climáticas causam no balanço hídrico de uma região é de suma importância, visto que é um dos principais fatores para o entendimento e projeção dos impactos que estas mudanças causarão nos recursos hídricos. A escassez de água é um dos possíveis resultados das mudanças climáticas, que é um grande problema em muitas regiões e suas consequências são mais evidentes no desenvolvimento agrícola, onde fica visível a necessidade de métodos de irrigação adequados para essa situação, onde se torna crucial o entendimento das variações espaciais e temporais da evapotranspiração de referência (GUNASEKARA et al., 2013). De acordo com o *Fifth Assessment Report (AR5)* do IPCC (2014) as mudanças climáticas irão amplificar e criar novos riscos para os sistemas naturais e humanos. Esses riscos são desigualmente distribuídos e geralmente maiores para pessoas e comunidades mais humildes em países de todos os níveis de desenvolvimento.

2.3 Mudança climática / análise de tendência

De acordo com o IPCC (2014) cada uma das últimas três décadas vem sendo mais quente, o período de 1983 a 2012 foi provavelmente o período de 30 anos mais quente desde os últimos 1400 anos. Foi verificado um aumento de 0,85 °C entre 1880 a 2012. Além desse aquecimento brusco durante os últimos anos, a temperatura na superfície terrestre vem mostrando uma grande variabilidade, e devido a esta variabilidade natural, tendências baseadas em pequenos períodos são muito sensíveis e podem terminar por não representar corretamente a tendência climática à longo prazo.

A magnitude dos impactos relacionados com mudanças climáticas resulta da interação entre os perigos que elas podem trazer e a vulnerabilidade e exposição do homem e da natureza, incluindo sua capacidade de adaptação. Com o aumento do aquecimento do globo e outros elementos do sistema climático o risco de mudanças irreversíveis só aumenta, alguns riscos são particularmente relevantes para determinadas regiões enquanto outros são globais (MARENGO, 2010). Tendo noção desses perigos se torna necessária uma análise eficaz dos elementos climáticos para que possamos tomar medidas adaptativas que busquem amenizar ou até mesmo evitar grande parte das consequências causadas por essa mudança, e para essa análise é utilizado o estudo das tendências de variação dos elementos climáticos de maior relevância, como a evapotranspiração, temperatura, umidade relativa e radiação, mas devido à disponibilidade de dados para o período não será possível realizar uma análise da

radiação, visto que no período de 1965 a 2004 utilizaram-se estações convencionais, e estas não possuíam leitores de radiação solar na época.

A análise espacial e temporal das tendências de variáveis hidrometeorológicas relevantes nos permite verificar mudanças comportamentais e determinar em qual região uma variável está sofrendo mudanças significativas ao longo do tempo (SALVIANO, 2016). Podendo essa variação ser causada por fatores de origem antrópica como desmatamento, ou não antrópica como fenômenos naturais de larga escala (SERRA FILHO et al., 1975; MARENGO, 2010).

Para determinar a significância estatística de uma determinada tendência, em outras palavras, garantir que os valores sofrem um aumento ou redução por um motivo específico e não apenas acaso em determinado intervalo de tempo, são utilizados testes estatísticos.

Nesse contexto pode-se observar que o teste de Mann-Kendall (MK) tem sido utilizado muito comumente em estudos para analisar essa análise de significância estatística de tendências em séries temporais de variáveis ambientais (KARMESHU, 2012; ZHANG et al., 2009; MORAES et al., 1998; GROppo et al., 2008; NEETI & EASTMAN, 2011; DOUGLAS et al., 2000). Esse teste foi proposto inicialmente por Sneyers (1975) e se trata de um método sequencial e bastante robusto que é utilizado para avaliar se uma determinada série de dados possui uma tendência temporal de alteração significativa estaticamente (SALVIANO, 2016). Também se trata de um método não paramétrico, sendo assim não necessita de uma distribuição normal dos dados (YUE et al., 2002), sendo essa uma grande vantagem do método para o estudo em questão. Devido ao fato de o método considerar que, na hipótese de estabilidade de uma determinada série temporal, a sucessão de valores ocorrerá de forma independente, mantendo a distribuição de probabilidade como uma série aleatória simples (BACK, 2001), o método se mostra o mais apropriado para analisar mudanças climáticas. O teste de Mann-Kendall também possui uma grande vantagem que vale a pena ser citada, sendo essa o fato dele não ser afetado por mudanças bruscas ou por séries não homogêneas, ou seja, o teste não é fortemente afetado por valores extremos, como falhas, e também pode ser utilizado mesmo com dados faltantes, o tornando o método mais viável para o estudo.

2.3.1 Variáveis meteorológicas

Os principais parâmetros climáticos que afetam a evapotranspiração são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Com exceção da radiação global, os demais parâmetros terão sua tendência temporal analisada visando determinar os impactos e riscos futuros para a região, causados pelas mudanças climáticas.

Neste caso, entende-se “temperatura” (T) pelos valores máximos e mínimos em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), podendo ser diários, mensais e/ou sazonais dependendo da análise em questão. Este parâmetro se enquadra, juntamente com radiação solar incidente, velocidade do vento, umidade relativa e precipitação, nos “fatores climáticos” dentre os demais que afetam as taxas de evapotranspiração, sendo eles “fatores da planta” e “fatores do solo” (LEMOS FILHO et al., 2010), tendo uma relação direta com os valores de ET_o no sentido de que quando os valores de temperatura tendem a subir, os de evapotranspiração também e conseqüentemente uma queda de umidade relativa é verificada (MEDEIROS, 2003).

Em relação à radiação extraterrestre (R_a), Chang (1968) a considera o elemento mais importante se tratando da determinação da evapotranspiração, exceto em regiões que apresentam advecções, fenômeno que costuma ocorrer em regiões úmidas que estão circundadas por áreas secas, nesse caso os fatores velocidade do vento e umidade do ar ganham uma maior importância no processo de determinação da taxa de evapotranspiração.

O valor da radiação é expresso em Megajoules por metro quadrado por dia ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), e por se tratar de um dado não comumente disponível, pode ser determinado através de equações quando não está presente no banco de dados utilizado.

A umidade relativa (UR), dada em porcentagem (%), é utilizada para determinar a pressão de vapor diária, e_a , em kilopascal (kPA) quando este valor não está disponível no banco de dados. É comumente visto que à medida que ocorre uma queda na temperatura do ar, ocorrem também um aumento na umidade relativa e uma diminuição na taxa de evapotranspiração (MEDEIROS, 2003), dessa forma é possível observar que em climas úmidos de regiões tropicais, mesmo possuindo muita energia disponível, os altos valores de umidade reduzem as taxas de evapotranspiração, pois o ar sempre está próximo da saturação (LEMOS FILHO et al., 2010).

A velocidade do vento (U_2) é mensurada em metros por segundo ($m.s^{-1}$), sendo necessário que a mesma seja medida a 2m acima do nível do solo para poder ser utilizada na metodologia.

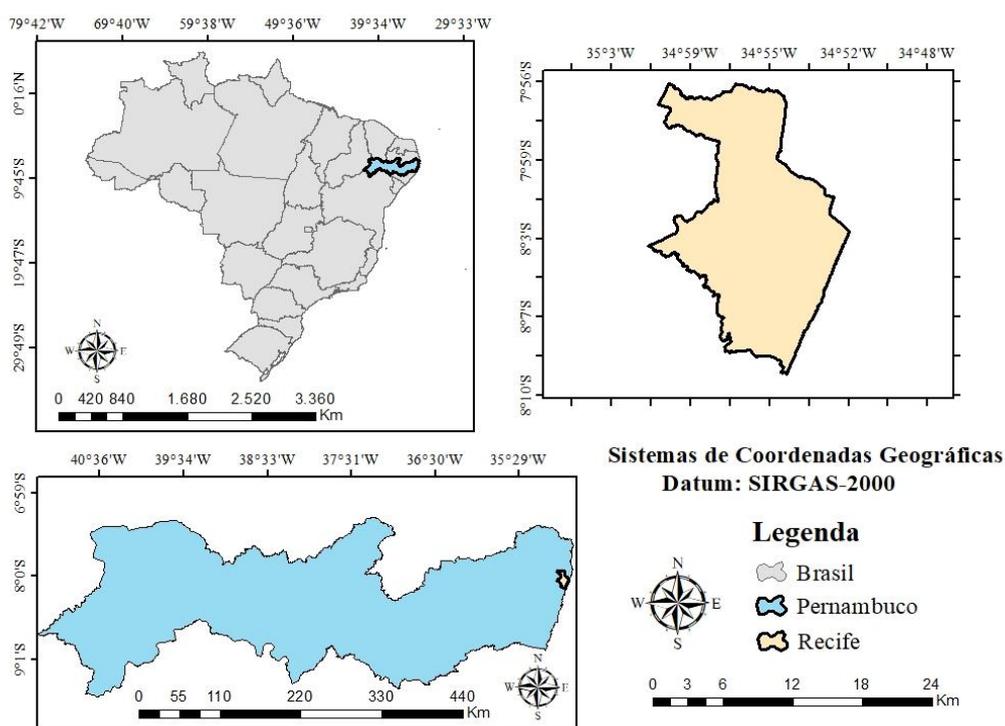
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico apresentam-se tanto a área de estudo a qual o trabalho aborda, quanto todo o procedimento e metodologia do mesmo.

3.1 Área de estudo

A área de estudo em questão (representada na figura 1) corresponde ao município de Recife, que possui área de 218,435 km² e população de aproximadamente 1.637.834 habitantes (IBGE, 2017), sendo esta a capital do estado de Pernambuco no Nordeste do Brasil. O município de Recife limita-se ao norte com as cidades de Olinda e Paulista, ao sul com o município de Jaboatão dos Guararapes, a oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe, e a leste com o Oceano Atlântico. Está situado no litoral nordestino ocupando uma posição central, a 800 km das metrópoles Salvador e Fortaleza.

Figura 1 – Estado de Pernambuco com demarcação da região estudada (Recife)



Fonte: O Autor (2019).

A região apresenta temperaturas médias mensais próximas a 25 °C, umidade relativa do ar média anual de 84% e amplitude térmica abaixo de 5% (INMET). Com exceção do período chuvoso que vai de maio a outubro, a radiação solar é muito incidente e não varia muito ao longo do ano.

O clima da região é classificado como Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental, apresentando chuvas de outono-inverno (SANTOS et al., 2013). Os valores totais médios anuais de precipitação da Região Metropolitana do Recife (RMR) apresentam grande variabilidade, indo de valores maiores que 2.200 mm, em regiões litorâneas, até 1.200 mm, decrescendo à medida que se afastam do litoral. Também é observado grandes variações interanuais, podendo assumir valores entre 1.200 a 3.500 mm, no litoral, e 500 a 2.000 mm, nas áreas mais distantes do oceano, sendo 47% dos totais anuais pertencentes ao trimestre chuvoso (maio, junho e julho) e 7,5% no trimestre mais seco (outubro, novembro e dezembro) (CPRM, 2003).

3.2 Coleta de dados

No estudo utilizou-se dados meteorológicos obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), esses dados são referentes ao período de Janeiro de 1965 a Dezembro de 2017, a estação utilizada (Código OMM: 82900) está localizada segundo as seguintes coordenadas: 8,05 ° de latitude Sul, 34,95 ° de latitude Leste e 10,00 m de altitude. Para a aplicação do método de Penman-Monteith e análise de tendência foram obtidos, tanto diariamente quanto suas respectivas médias mensais, as seguintes variáveis: Temperatura máxima em °C (T_{max}), temperatura mínima em °C (T_{min}), velocidade do vento em m/s (u_2) (vale ressaltar que a verificação da altura em que a velocidade do vento foi medida é muito importante e no presente trabalho os dados de velocidade do vento foram medidos à 10m da superfície do solo (u_{10}) e corrigidos para a altura de 2m a partir da equação sugerida por Allen (1998), umidade relativa média em % (RH_{max}) e umidade relativa mínima em % (RH_{min}). Também se obteve dados referentes à precipitação para auxiliar na validação das variáveis obtidas.

A estação referente à Recife de código OMM 82900 foi a com maior disponibilidade de dados satisfatórios ao longo do período, apesar de haver ocorrência de falhas pontuais ou contínuas por um determinado intervalo de tempo.

3.3 Processamento dos dados

Após a obtenção dos dados foi feita a transferência dos mesmos para o programa adequado de processamento de dados, para esse trabalho foi utilizado o software da Microsoft: Excel – nele foram realizados todos os procedimentos de cálculo e organização

dos dados para as análises que serão comentadas no presente trabalho. Primeiramente foi feita uma programação a fim de otimizar e automatizar o processo de estimativa da ET_o , em seguida foi realizada uma busca por falhas nos dados, utilizando as funções do programa, e um procedimento onde é feito o gráfico de linha da série e a partir deste gráfico foi possível observar os pontos que possuem falhas ou falta de dados, a partir dessa verificação que se confirmou a possibilidade da utilização deste banco de dados para o trabalho, já que possuíam uma quantidade razoável de dados em relação às falhas.

3.4 Método de Penman-Monteith-FAO

Em 1948, Penman combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e elaborou uma equação capaz de computar a evapotranspiração de uma superfície de água a partir de dados climatológicos como: temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e insolação (MATZENAUER et al., 1983). Esse método de combinação foi mais a frente desenvolvido por vários pesquisadores, dentre eles estava Monteith que ampliou a capacidade do método, assim ficando conhecido como método de Penman-Monteith.

Desde sua primeira aparição no *Irrigation and Drainage paper No. 24 'Crop Water Requeriments'* da FAO, o método modificado de Penman-Monteith foi considerado o que oferecia os melhores resultados com a mínimo possível de erros em relação à superfície estudada. O método PM-FAO, que se dá pela eq. (1), utiliza uma vasta gama de variáveis meteorológicas, o que pode ser associado com sua “precisão”, dentre elas pode-se destacar a velocidade do vento, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar e umidade do ar.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T_{avg} + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

onde:

ET_o evapotranspiração de referência diária [mm]

R_n saldo de radiação na superfície da vegetação [$MJ m^{-2} dia^{-1}$]

G fluxo de calor no solo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]

T_{avg} média entre extremos de temperatura do ar a 2 metros de altura [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 velocidade média do vento a 2 metros de altura [m s^{-1}]

e_s pressão de vapor média na saturação [kPa]

e_a pressão de vapor parcial [kPa]

$(e_s - e_a)$ déficit de pressão de vapor na saturação [kPa]

Δ declividade da curva T x pressão de vapor na saturação [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

γ constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Também foram propostos por Allen et al. (1998) procedimentos de cálculo para o caso de falta de dados faltantes, que estão bem descritos e exemplificados no *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, há um conjunto completo de equação para calcular os parâmetros do método PM-FAO de acordo com o(s) dado(s) faltante(s). A partir desses procedimentos foi possível diminuir uma boa parte das falhas presentes no intervalo deste estudo, facilitando a obtenção dos valores de ET_o mensais e anuais. Os procedimentos em questão são os seguintes:

1. Em caso de falta de dados de umidade, a pressão de vapor parcial (e_a) é calculada igualmente a pressão de vapor na saturação (e^o) mas à uma temperatura 2 a 3°C inferior à média da temperatura mínima do mês onde ocorreu a falha.
2. Em caso de falta de dados de insolação, a radiação solar é calculada como a raiz da diferença entre a temperatura máxima e mínima média do mês onde ocorreu a falha, multiplicado pela radiação extraterrestre e o coeficiente de ajuste (0,19 para recife).
3. Em caso de falta de dados de velocidade do vento a 2 metros, o valor de 2m/s pode ser adotado como estimativa. Esse valor abrange mais de 2000 estações meteorológicas em volta do globo.

3.5 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é um método sequencial e não paramétrico, que é utilizado para determinar se uma série de dados possui ou não uma

tendência temporal de variação dos dados estatisticamente significativa. Tendo em vista sua classificação como um método não paramétrico, para o mesmo não se faz necessária uma distribuição normal dos dados (YUE et al., 2002). O método consiste em rejeitar ou não a hipótese nula (H_0), que implica a não ocorrência de tendência na série de dados, com a adoção de um determinado nível de significância (α). Esse nível de significância se trata da probabilidade de ocorrer o erro tipo 1 – rejeitar a hipótese H_0 quando a mesma é verdadeira.

O teste é válido quando os valores amostrais de uma série de dados estão de acordo com o modelo: $x_i = f(t_i) + \varepsilon_i$, onde $f(t_i)$ representa uma função contínua monótona crescente ou decrescente, pode-se considerar que o residual ε_i seja de uma mesma distribuição com média zero, dessa forma tendo uma variância constante da distribuição ao longo do tempo. A hipótese H_0 implica que x_i , sendo esse um termo da série de dados onde se aplicará o método, é independente, já a H_1 diz que existe uma tendência na variável x . A variável estatística S , para uma série de n dados onde $S_{nl}(x_i - x_j)$ representa a função de sinal definida pela eq. (2), é calculada pela eq. 3.

$$S_{nl}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_i - x_j > 0 \\ 0, & \text{se } x_i - x_j = 0 \\ -1, & \text{se } x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n S_{nl}(x_i - x_j) \quad (3)$$

Quando $n \geq 10$, o S estatístico pode ser comparado com uma distribuição normal, com média zero onde sua variância $Var(S)$ é obtida através da eq. (4), sendo m o número de grupos com observações iguais e t_i o número de observações iguais no grupo i . E então o teste estatístico padronizado Z_s é realizado através da eq. (5).

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

A ocorrência de valores positivos em Z_s indica tendência de crescimento, enquanto negativos de decrescimento, o teste é feito se baseando em α através da seguinte verificação, se $|Z_s| > Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$, a hipótese nula (H_0) é rejeitada e verifica-se a existência de uma tendência significativa àquele nível. $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ é obtido através da tabela de distribuição normal padrão.

No presente estudo foram utilizados os seguintes níveis de significância: 1%; 5%; 10%, de forma que fosse possível minimizar ao máximo a ocorrência do erro tipo 1. A H_0 será rejeitada quando $|Z_s|$ for maior que 2,576 para 1% de significância; 1,960 para 5% e 1,645 para 10%.

3.6 Regressão Linear

Dados n pares de valores de duas variáveis, X_i, Y_i (com $i = 1, 2, \dots, n$), se admitirmos que Y é função linear de X , podemos estabelecer uma regressão linear simples, cujo modelo estatístico é dado pela eq. (6)

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + u_i \quad (6)$$

onde α e β são parâmetros, X representa a variável explanatória e Y a variável dependente.

O coeficiente angular da reta (β) é também denominado coeficiente de regressão e o coeficiente linear da reta (α) é também conhecido como termo constante da equação de regressão.

O método foi utilizado no presente estudo para se verificar a acentuação das tendências de crescimento ou decrescimento, faz-se uma análise do coeficiente linear da reta obtida visto que o mesmo indica a taxa de variação dos dados, nesse caso, ao longo do tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na pesquisa, tanto de forma visual como escrita, assim como um estudo relacionado aos mesmos.

4.1 Análise dos resultados

Para determinados anos alguns meses tiveram falhas e foram desconsiderados na análise do período entre 1965 e 2017, principalmente para os anos de 2008 e 2009, esses foram os anos que apresentaram mais falhas, mas devido aos demais anos do período terem apresentado uma baixa quantidade de falhas (inferior à 16% – 2 meses dentre os 12 do ano) eles foram aceitos dentro do intervalo do estudo. Para 2008 as falhas começaram em agosto e duraram até dezembro – assim sendo esses meses foram desconsiderados nas análises – já para 2009 a falha foi de janeiro a junho, também invalidando esses meses. O estudo tem um total de 636 meses (53 anos), a Tabela 1 representa a quantidade de meses onde não ocorreram falhas para cada uma das séries de dados meteorológicos em valor absoluto e porcentagem do total de tempo do estudo.

Sendo assim, o período foi definido a partir da disponibilidade de dados satisfatórios na estação, mesmo ocorrendo falhas em alguns meses o método utilizado para estimar a ET_o sugere medidas para sobrepor estas falhas.

Tabela 1 - Quantidade de dados mensais válidos para cada variável meteorológica

Variável	Número de meses com dados sem falhas (% do total)
u_2	576 (91)
$T_{máx}$	584 (92)
$T_{mín}$	578 (90)
$UR_{méd}$	531 (83)

Fonte: O Autor (2019).

Para a realização do procedimento de análise de tendências, os dados foram organizados em forma de média anual e então foram aplicados os métodos, dessa forma obtendo um resultado que compreendesse todo o período estudado. Para os anos que tiveram meses inválidos (como 2008 e 2009) na sua média anual de determinada variável meteorológica foi desconsiderado estes meses.

Os valores médios para cada variável meteorológico assim como seus desvios padrão estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios e desvios padrão de cada variável meteorológica

Mês	Valores médios e desvios padrão			
	u_2	$T_{máx}$	$T_{mín}$	$UR_{méd}$
Janeiro	2,57 ± 0,74	29,67 ± 1,42	23,47 ± 1,71	74,46 ± 2,95
Fevereiro	2,48 ± 0,70	29,76 ± 1,29	23,74 ± 1,80	75,07 ± 3,66
Março	2,23 ± 0,61	29,66 ± 1,35	23,65 ± 1,69	78,09 ± 3,68
Abril	2,10 ± 0,60	29,17 ± 1,34	23,31 ± 1,62	81,33 ± 3,86
Mai	2,11 ± 0,68	28,36 ± 1,43	22,83 ± 1,29	83,83 ± 3,20
Junho	2,29 ± 0,76	27,41 ± 1,34	22,19 ± 1,17	84,53 ± 2,77
Julho	2,44 ± 0,83	26,74 ± 1,39	21,62 ± 1,18	83,95 ± 2,78
Agosto	2,67 ± 0,92	26,93 ± 1,41	21,31 ± 1,36	80,83 ± 2,49
Setembro	2,84 ± 0,87	27,60 ± 1,29	21,98 ± 1,41	77,73 ± 2,93
Outubro	2,72 ± 0,78	28,58 ± 1,26	22,70 ± 1,57	74,84 ± 3,40
Novembro	2,79 ± 0,82	29,32 ± 1,21	22,96 ± 1,78	72,90 ± 2,67
Dezembro	2,72 ± 0,79	29,63 ± 1,30	23,27 ± 1,98	73,62 ± 3,15

Fonte: O Autor (2019).

Levando em consideração estas correções para a evapotranspiração PM-FAO a Tabela 3 representa a quantidade de anos onde não ocorreram falhas na ET_o mês a mês em valor absoluto e porcentagem do total de tempo do estudo.

Tabela 3 - Quantidade de dados de ET_o sem falhas para cada mês do ano

Mês	Número de anos com ET_o sem falhas (% do total)
Janeiro	52 (98)
Fevereiro	51 (96)
Março	52 (98)
Abril	52 (98)
Mai	52 (98)
Junho	52 (98)
Julho	53 (100)
Agosto	52 (98)
Setembro	52 (98)
Outubro	52 (98)
Novembro	51 (96)
Dezembro	52 (98)

Fonte: O Autor (2019).

4.2 Estimativa da evapotranspiração de referência

Os valores médios diários da evapotranspiração de referência e seus respectivos desvios padrão, para o período de 1965-2017, estão apresentados na Tabela 4. Os valores variaram entre 3,51 mm no mês de junho e 5,10 mm nos meses de novembro e dezembro, vale ressaltar que é possível observar a sazonalidade – como por exemplo o fato de o verão apresentar os maiores valores de evapotranspiração de referência ao longo do ano, visto que se trata de uma estação que apresenta temperaturas elevadas. Os valores baixos

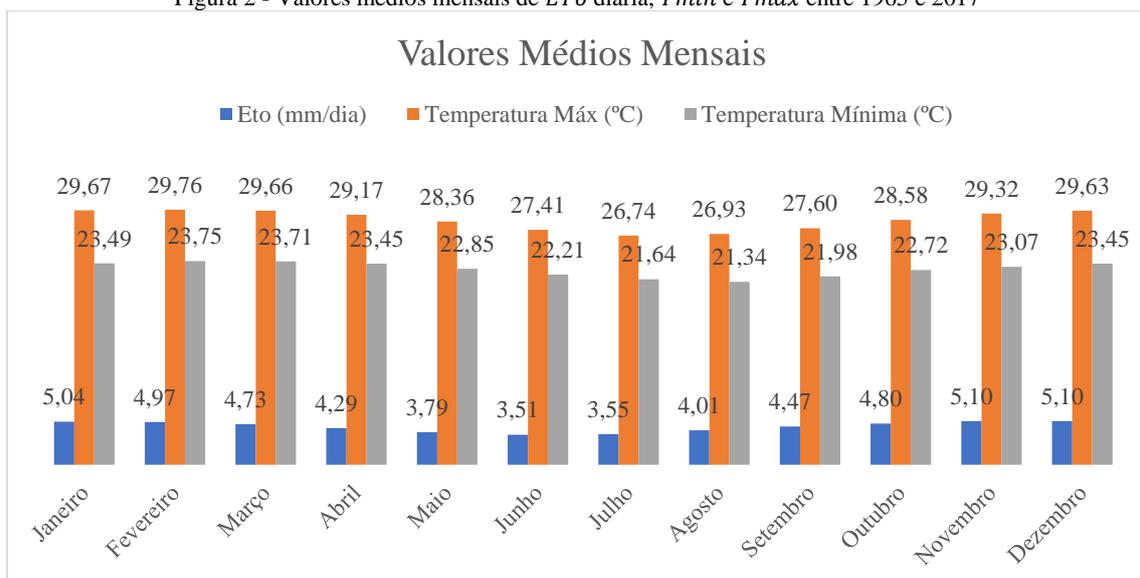
verificados em junho e junho podem ser relacionados com o fato de estarem durante o período de inverno, já os altos valores vistos em novembro, dezembro e janeiro estão relacionados com primavera e verão, que é quando ocorre uma maior concentração na quantidade de energia solar para condicionar a evapotranspiração.

Tabela 4 - Valores médios e desvios padrão da ET_o diária entre 1965 e 2017

Mês	Valores médios da ET_o diária e desvios padrão (mm)
Janeiro	5,04 ± 0,39
Fevereiro	4,97 ± 0,39
Março	4,73 ± 0,32
Abril	4,29 ± 0,31
Mai	3,79 ± 0,34
Junho	3,51 ± 0,33
Julho	3,55 ± 0,37
Agosto	4,01 ± 0,33
Setembro	4,47 ± 0,30
Outubro	4,80 ± 0,35
Novembro	5,10 ± 0,31
Dezembro	5,10 ± 0,39

Fonte: O Autor (2019).

A Figura 2 é uma relação entre as médias mensais de temperatura máxima, mínima e ET_o diária, representados numa escala temporal mensal ao longo do ano. É possível observar que os maiores valores de evapotranspiração são atingidos nos meses que apresentam as temperaturas mais elevadas, mas nos meses de agosto e julho ocorre uma relação diferente onde julho com temperatura máxima de 21,64°C apresenta uma ET_o menor que agosto com temperatura máxima de 21,34°C, a partir disso pode-se perceber as incertezas que ocorrem em métodos que se baseiam apenas na temperatura do ar, dentre outros métodos que desconsideram outros parâmetros climáticos na sua estimativa, esse é um dos motivos que torna os procedimentos de correção e ajustes tão essenciais quando se utilizar desses métodos de estimativa mais simples.

Figura 2 - Valores médios mensais de ET_o diária, T_{min} e T_{max} entre 1965 e 2017

Fonte: O Autor (2019).

4.3 Análise de tendências

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos no teste de Mann-Kendall, indicando seus níveis de significância, e os coeficientes angulares da regressão linear, os quais indicam a taxa de crescimento ou caimento dos parâmetros climáticos em questão para o período de 1965-2017. Dessa forma a tabela resume as tendências de variações anuais para os parâmetros climáticos utilizados na determinação da evapotranspiração de referência.

Tabela 5 - Tendências de variação encontradas para as variáveis meteorológicas entre 1965 e 2017

Mês	Teste de Mann-Kendall e Taxa de variação							
	u_2		$T_{máx}$		$T_{mín}$		$UR_{méd}$	
	α ($\frac{mm}{mês.ano}$)	Z_{TMK}	α ($\frac{mm}{mês.ano}$)	Z_{TMK}	α ($\frac{mm}{mês.ano}$)	Z_{TMK}	α ($\frac{mm}{mês.ano}$)	Z_{TMK}
Jan	-0,0279 ↓	-4,1113***	-0,0562 ↓	-2,4226**	0,0891 ↑	5,5159***	-0,0248 ↓	-1,6966*
Fev	-0,0245 ↓	-3,2002***	-0,0476 ↓	-2,6803***	0,0946 ↑	5,2794***	-0,0967 ↓	-2,4854**
Mar	-0,0178 ↓	-2,0122**	-0,0429 ↓	-2,2490**	0,0888 ↑	5,7526***	-0,1376 ↓	-3,9534***
Abr	-0,0180 ↓	-2,3594**	-0,0518 ↓	-2,0596**	0,0821 ↑	5,2002***	-0,1204 ↓	-3,2976***
Mai	-0,0254 ↓	-3,2590***	-0,0513	-1,0495	0,0634 ↑	4,7583***	-0,0912 ↓	-4,0481***
Jun	-0,0306 ↓	-3,9534***	-0,0563 ↓	-1,9964**	0,0521 ↑	3,6378***	-0,0614 ↓	-2,1069**
Jul	-0,0381 ↓	-5,2314***	-0,0604 ↓	-2,6234***	0,0543 ↑	4,2649***	-0,0440 ↓	-1,6876*
Ago	-0,0394 ↓	-4,9635***	-0,0611 ↓	-2,4383**	0,0675 ↑	5,3265***	-0,0227	-0,4024
Set	-0,0370 ↓	-4,8530***	-0,0519 ↓	-1,9964**	0,0714 ↑	4,9477***	-0,0718 ↓	-2,7698***
Out	-0,0312 ↓	-3,9534***	-0,0522 ↓	-2,6593***	0,0849 ↑	6,0682***	-0,0515 ↓	-2,6751***
Nov	-0,0350 ↓	-4,7921***	-0,0496 ↓	-2,1768**	0,0966 ↑	6,0592***	-0,0842 ↓	-3,0540***
Dez	-0,0313 ↓	-4,0481***	-0,0491 ↓	-1,7913*	0,0990 ↑	5,4843***	-0,0501 ↓	-2,3752**

*** Significativo a 1% de probabilidade

** Significativo a 5% de probabilidade

* Significativo a 10% de probabilidade

↑ Tendência de aumento (significativo a 10%)

↓ Tendência a diminuição (significativo a 10%)

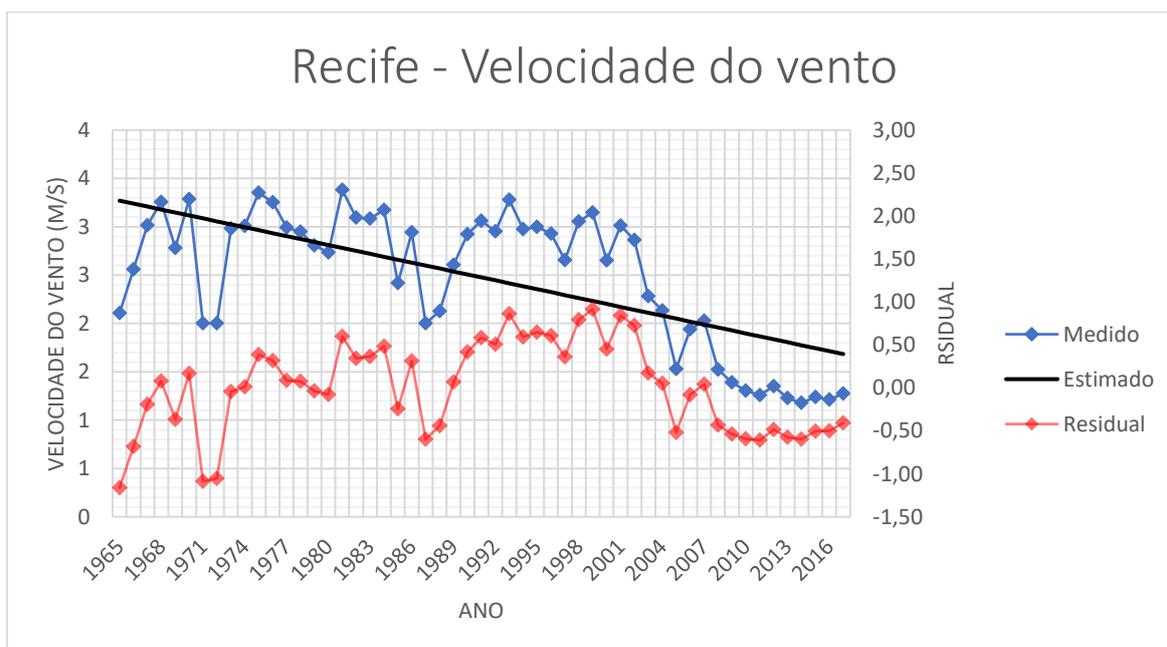
Valores sem símbolo são estatisticamente insignificantes ($Z_{1-\frac{\alpha}{2}} > |Z_{TMK}|$)

Fonte: O Autor (2019).

4.3.1 Velocidade do vento

Em relação à velocidade do vento foi verificado uma série com tendências altamente significantes estaticamente em escala anual, toda a série foi significativa à 5% de probabilidade sendo sua maior parte também significativa à 1%, essa série apresenta um dos valores mais elevados do TMK atingindo até 5,2315. A tendência se mostrou decrescente ao longo do período estudado e verificaram-se taxas de decrescimento que variaram entre $0,0394 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano e $0,0178 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, referentes aos meses de agosto e março respectivamente. Também foi possível verificar essas mudanças através da Figura 3, onde estão os valores medidos nas estações, estimados pelo método de regressão linear e o residual – que é a diferença entre o medido e o estimado.

Figura 3 - Série temporal e tendência detectada para a média anual de velocidade do vento entre 1965 e 2017



Fonte: O Autor (2019).

Analisando em uma perspectiva sazonal, pode-se verificar que no verão, especificamente de dezembro até março, houve uma queda na taxa de variação da velocidade do vento, indo de $0,0313 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, a $0,178 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, sendo esse o período onde a taxa de variação da velocidade do vento (u_2) atingiu seu mínimo.

No outono é apresentado o início do aumento na taxa de variação com seu valor subindo até $0,0306 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, em junho.

Em relação ao inverno é a estação onde o valor da taxa de variação atinge seu máximo $0,0394 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, no mês de agosto, sendo esse o mês com maior redução na velocidade do vento ao longo dos 53 anos estudados.

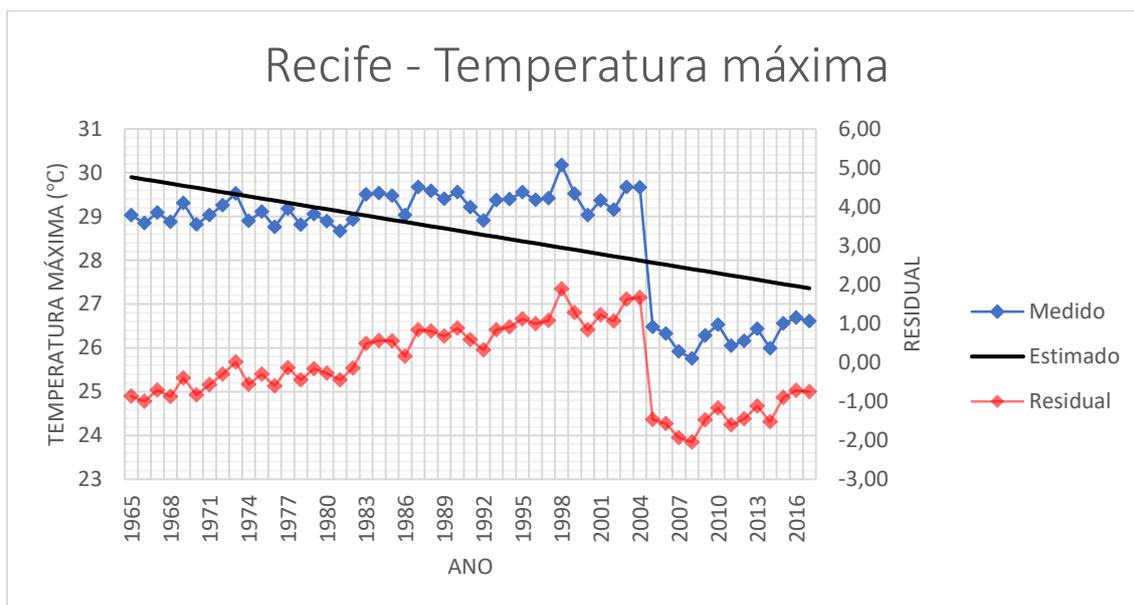
Já na primavera que é o período de transição de estação fria para quente os valores da começam a cair para os níveis verificados no verão, com exceção de novembro onde houve um leve aumento na taxa para $0,0350 \text{ m. s}^{-1}/\text{mês}$, por ano, mas logo em seguida já foi observado o decréscimo da mesma.

Percebe-se então que em Recife, para o período estudado, essa variável apresentou um comportamento relacionado com as estações do ano, sendo maiores taxas de decréscimo nas estações frias e menores taxas nas estações quentes, com um período de transição bem definido. Com base nos resultados também é possível afirmar que a cidade de Recife vem sofrendo uma redução na velocidade do vento com variações acentuadas ao longo dos anos e apresenta uma tendência bem definida.

4.3.2 Temperatura

Em relação aos valores obtidos para as médias anuais de temperatura máxima apenas os meses de maio e dezembro apresentaram nenhuma e baixa significância respectivamente, para os demais meses a série apresentou tendência estatisticamente significantes no mínimo a 10% de significância. Foi detectado uma queda no valor da temperatura máxima ao longo do período do estudo – fenômeno que será mais discutido adiante pois este comportamento foi definido a partir da grande diferença entre os valores de 2004 e 2005 – com destaque em julho e agosto, que apresentaram a maior taxa de queda ao longo dos anos, sendo agosto a maior taxa de decréscimo, para o parâmetro em questão, na série estudada, com valor de $0,0611 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mês}$, por ano, e março a menor, com valor de $0,0429 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mês}$, por ano. Os resultados que mostram o comportamento da temperatura máxima ao longo do período estão visualmente representados na Figura 4, onde está apresentado o valor medido, a estimativa por regressão linear e o residual.

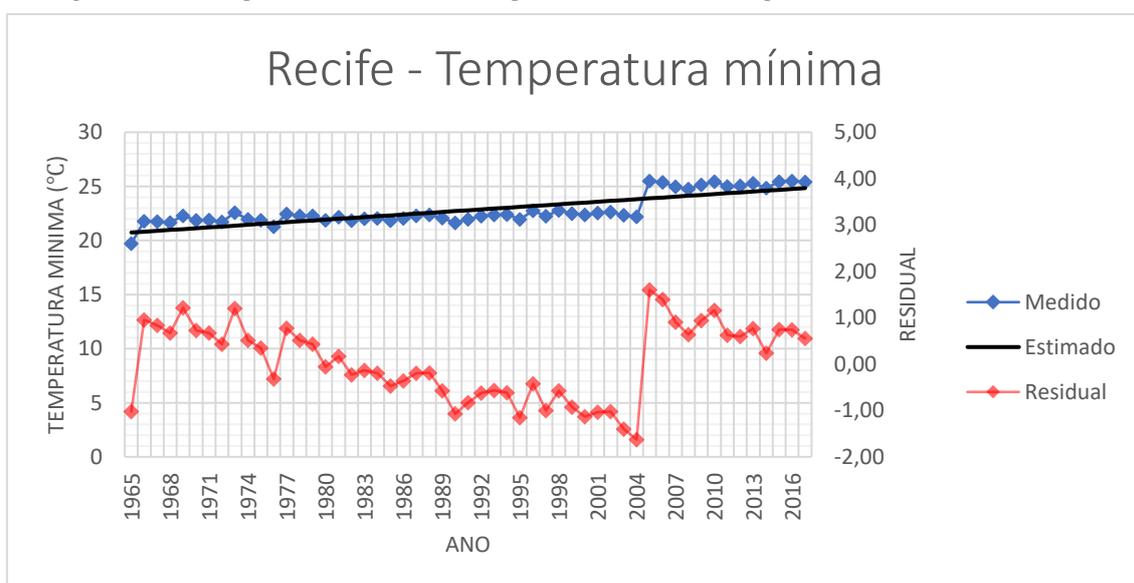
Figura 4 - Série temporal e tendência detectada para a média anual de temperatura máxima entre 1965 e 2017



Fonte: O Autor (2019).

Já em relação aos resultados obtidos para a temperatura mínima, toda a série apresentou alta significância estatística, sendo todos os meses altamente significantes ($\alpha = 0,01$), e apresentou uma tendência de crescimento – de forma oposta à temperatura máxima, devido à queda repentina entre 2004 e 2005 – para o período do estudo. Sendo o valor máximo da taxa de crescimento $0,0990\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mês}$, por ano, no mês de dezembro e a mínima $0,0521\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mês}$, por ano, em junho, no verão e inverno respectivamente. Na Figura 5 é possível visualizar o crescimento da temperatura mínima ao longo do período, onde está apresentado o valor medido, a estimativa por regressão linear e o residual.

Figura 5 - Série temporal e tendência detectada para a média anual de temperatura mínima entre 1965 e 2017



Fonte: O Autor (2019).

Pode-se observar que no verão os valores de temperatura máxima mostraram uma queda na taxa de decrescimento, indo de 0,0491 °C/mês, por ano (no mês de dezembro), até o valor mínimo da taxa para a série deste parâmetro 0,0429 °C/mês, por ano (para o mês de março), se mostrando de acordo com a estação verão, visto que é uma estação onde a temperatura tende a se elevar, ainda que no mês de janeiro tenha sido observado um aumento na taxa de decrescimento. O mês de março se mostrou menos afetado pela redução da temperatura máxima ao longo do período do estudo. Toda a estação se mostrou significativa estatisticamente sendo março o mês com a menor significância ($\alpha = 0,05$). Em relação à temperatura mínima nesta mesma estação, de forma contrária à temperatura máxima, foi observado uma tendência de aumento dos valores além de um comportamento instável na variação das taxas de crescimento com crescimento e decrescimento ao longo dos meses do verão, em dezembro foi observado uma taxa de 0,0990 °C/mês, por ano (a maior da série), seguido de uma queda no valor para 0,0891 °C/mês, por ano, em janeiro acompanhado de um aumento em fevereiro para 0,0946 °C/mês, por ano, e por fim um decrescimento para 0,0888 °C/mês, por ano, em março. Toda a série apresentou alta significância ($\alpha = 0,01$). Esse comportamento torna visível a alta variabilidade da taxa de variação da temperatura mínima nesta estação ao longo do período do estudo.

No outono para a temperatura máxima foi observado um comportamento similar ao verão para a temperatura mínima, as taxas de decrescimento variaram aumentando e diminuindo, não mostrando um comportamento regular. A maior taxa de decrescimento da temperatura máxima para esta estação foi de 0,0563 °C/mês, por ano, em junho e o menor valor assumido pela taxa foi de 0,0513 °C/mês, por ano, em maio – desconsiderando o mês de março, visto que este foi incluído no verão devido à maior parte do mês estar nesta estação – entretanto esse mês se mostrou não significativo estatisticamente para a série. Toda a estação – exceto o mês de maio – apresentou alta significância estatística sendo o mês de abril o com menor significância ($\alpha = 0,05$). Dessa forma fica evidenciado que para o outono não foi verificado um comportamento regular de variação das taxas de decrescimento da temperatura máxima para o período estudado. Já para a temperatura mínima no outono foi visto um comportamento regular de decrescimento da taxa de aumento do parâmetro ao longo da estação, com valores variando de 0,0821 °C/mês, por ano, no mês de abril – vindo de uma redução após o mês de março – até 0,0521 °C/mês, por ano, em junho, sendo esse o menor valor para a série.

Esse decréscimo na taxa de aumento da temperatura mínima pode ser relacionado ao outono visto que é a transição do verão para o inverno e tende a ocorrer uma diminuição na temperatura, assim tomando valores menores de temperatura mínima.

No inverno, a temperatura máxima apresentou um aumento na sua taxa de decréscimo, partindo de 0,0604 °C/mês, por ano, em julho – já apresentando um aumento em relação ao mês anterior – indo até 0,611 °C/mês, por ano, em agosto, mas apresentou uma queda no mês de setembro para 0,0519 °C/mês, por ano – o que pode ser relacionado ao início da primavera no fim deste mês, que traria um aumento dos valores de temperatura máxima. Toda a série foi significativa sendo o mês de julho destaca pela maior significância estatística na estação ($\alpha = 0,01$). Em relação à temperatura mínima foi observado um claro aumento na taxa de crescimento da temperatura mínima com valores entre 0,0543 °C/mês, por ano, no mês de julho – já partindo de um aumento em relação ao mês anterior – e 0,0714 °C/mês, por ano, em setembro, mostrando que nos invernos – do período estudado – a temperatura mínima sofreu um aumento. Toda a série foi altamente significativa ($\alpha = 0,01$).

Para a primavera, em relação à temperatura máxima foi observado uma clara redução da taxa de queda deste parâmetro com os valores variando entre 0,522 °C/mês, por ano, no mês de outubro – entretanto foi observado um leve aumento em relação ao mês anterior – e 0,0491 °C/mês, por ano, em dezembro, tal redução na taxa de queda da temperatura máxima pode ser relacionado ao período de transição de estação fria para estação quente, onde as temperaturas máximas tendem a se elevar. Toda a série foi significativa durante a estação sendo novembro a com menos significância estatística ($\alpha = 0,10$). Sobre a temperatura mínima foi observado também um claro aumento na taxa de crescimento deste parâmetro com os valores variando entre 0,0849 °C/mês, por ano, em outubro – apresentando um aumento em relação ao mês anterior – e 0,0990 °C/mês, por ano, em dezembro. Toda a série foi altamente significativa ($\alpha = 0,01$) e o comportamento regular de aumento pode ser associado também à transição de estação fria para quente, causando um aumento nos valores de temperatura mínima.

Somando a tendência de aumento da temperatura mínima ao longo de todo período estudado com um aumento da temperatura máxima observado entre 1965 e 2004 fica claro que nesse intervalo houve um aumento da temperatura como um todo no estado. Entre os anos de 2004 e 2005 ocorre uma queda no valor da temperatura máxima que – em uma perspectiva anual no período de 1965 a 2017 – torna a tendência de variação

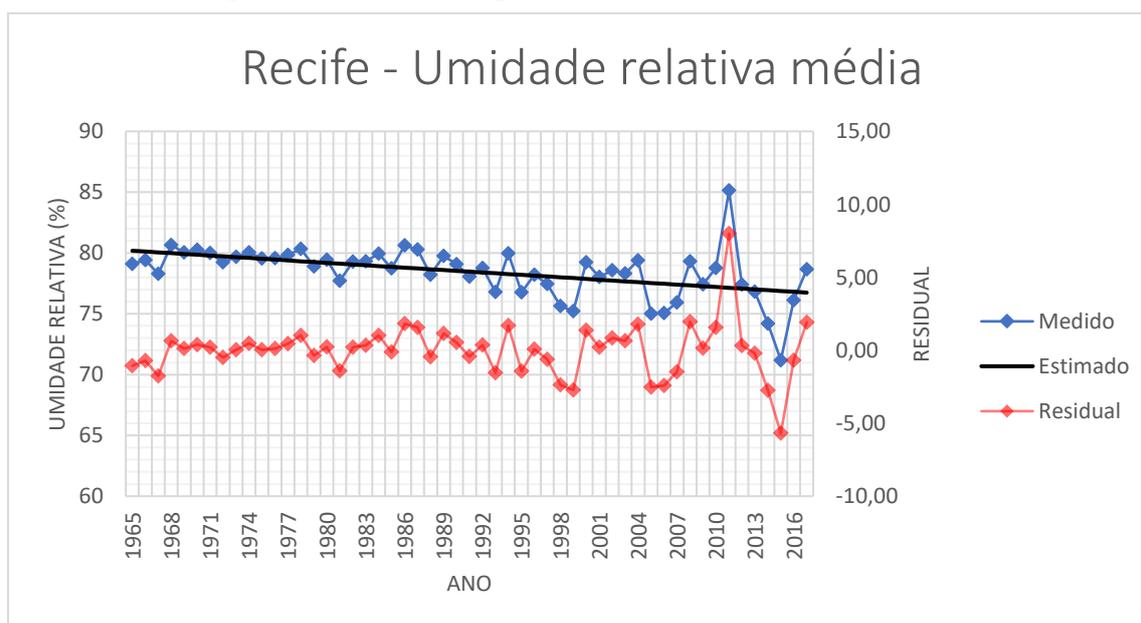
deste parâmetro negativa, implicando assim uma tendência de diminuição da temperatura máxima, entretanto é possível observar pela Figura 4 que para o período de 2005 até 2017 ocorre também um aumento nos valores de temperatura máxima, com valores variando entre 26,48 °C (2005) e 27,39 °C (2017).

Desta forma é possível afirmar que analisando os resultados obtidos para a temperatura da cidade ocorreu um aquecimento da cidade ao longo do período estudado, a velocidade de tais mudanças variou ao longo do ano devido aos aspectos climáticos de cada estação e como os mesmos influenciam no clima da cidade.

4.3.3 Umidade relativa média

Para a umidade relativa foi observado uma tendência de decrescimento ao longo do período estudado, com destaque apenas em janeiro, julho e agosto, sendo o primeiro desses sem nenhuma significância estatística e os outros dois com baixa significância estatística ($\alpha = 0,10$), para os demais meses a série obteve alta significância sendo o mínimo de 5% em fevereiro, junho e dezembro. Os valores da taxa de decrescimento da umidade relativa variaram entre 0,0227 %/mês, por ano, em agosto, e 0,1376 %/mês, por ano, em março. Na Figura 6 estão representados os resultados que mostram o decrescimento da umidade relativa média ao longo do período estudado por meio do valor medido, a estimativa por regressão linear e o residual.

Figura 6 - Série temporal e tendência detectada para a média anual de umidade relativa média entre 1965 e 2017



Fonte: O Autor (2019).

No verão foi observado um comportamento não regular apresentando uma queda seguida de um aumento da taxa ao longo da estação, a queda na taxa de decrescimento foi verificada em janeiro onde a taxa assumiu o valor de 0,0248 %/mês, por ano – apresentando um decrescimento em relação ao mês anterior – logo em seguida foi verificado um aumento até atingir seu valor máximo na estação de 0,1376 %/mês, por ano, em março. O aumento na taxa de diminuição da umidade relativa média é o esperado para esta estação visto que se trata de uma estação quente onde a temperatura do ar tende a subir.

Para o outono foi verificado um comportamento regular apresentando uma queda na taxa de decrescimento da umidade relativa média ao longo da estação, os valores variaram entre 0,1204 %/mês, por ano, no mês de abril – partindo de uma queda em relação ao mês anterior – e 0,0614 %/mês, por ano, no mês de junho. O comportamento apresentado se mostra de acordo com a estação visto que se trata da transição de uma estação quente para uma fria os valores de umidade relativa tendem a se elevar, dessa forma diminuindo a taxa de decrescimento deste parâmetro.

Em relação ao inverno foi observado uma queda acentuada até o mês de agosto, no qual foi atingido o menor valor da série 0,0227 %/mês, por ano, seguido de um aumento em setembro para 0,0718 %/mês, por ano. O comportamento apresentado não foi regular durante toda a estação, mas para uma boa parte da mesma foi o esperado, visto que se trata de uma estação fria espera-se que haja um aumento na umidade relativa média do ar nesse período e assim uma queda na taxa de decrescimento deste parâmetro. Toda a estação foi significativa estatisticamente exceto pelo mês de agosto.

Na primavera um comportamento não regular, alternando entre aumento e queda da taxa de decrescimento da umidade relativa média ao longo dos meses da estação. O valor máximo atingido durante o outono foi de 0,0842 %/mês, por ano, no mês de novembro – vindo de um decréscimo em relação ao mês anterior – e o valor mínimo foi de 0,0501 %/mês, por ano, em dezembro. Todos os valores da série apresentaram alta significância estatística.

A umidade relativa, mesmo tendo apresentado uma tendência de queda ao longo do período do estudo, apresentou variações não bem definidas em determinadas estações ao longo do ano, dessa forma fica evidenciado que para este parâmetro é recomendado um estudo mais aprofundado para se apurar os fatores que possam causar alterações significativas nas suas tendências de variação.

4.3.4 Evapotranspiração de referência

Na Tabela 6 estão os resultados para o teste de Mann-Kendall juntamente com os encontrados pelo método de regressão linear para a evapotranspiração de referência diária – que foi determinada pelo método de Penman-Monteith-FAO – na tabela também está exposto o nível de significância dos resultados assim como se houve tendência de crescimento ou diminuição significativa.

Em relação à evapotranspiração de referência, não foi observado uma tendência significativa estatisticamente nos resultados – em uma perspectiva geral analisando todo o período do estudo – entretanto os meses de junho e agosto apresentaram uma tendência de diminuição significativa estatisticamente entre 1965 e 2017. Também foi observado que os resultados de ET_o sofreram uma leve diminuição no período do estudo, atingindo seu mínimo em 2011 onde foi observado uma ET_o de $3,51 \text{ mm.dia}^{-1}$ e máximo em 2015 com $4,76 \text{ mm.dia}^{-1}$. No período entre 2007 e 2017 foi verificado uma grande variabilidade dos resultados obtidos – já que anos anteriores a variação foi muito sutil – o que traria a necessidade de um estudo mais aprofundado neste intervalo de tempo para se identificar as causas desse comportamento.

As taxas de variação desse parâmetro climatológico foram majoritariamente de redução, sendo a maior taxa de redução observada em agosto com $0,0104 \text{ mm.dia}^{-1}$, por ano, e a menor em abril sendo essa $0,0019 \text{ mm.dia}^{-1}$, por ano, apenas em março foi encontrada uma taxa de aumento – mesmo essa sendo muito pequena – de $0,0005 \text{ mm.dia}^{-1}$, por ano. Na Figura 7 é possível ter uma melhor visualização dos resultados obtidos, assim como a estimativa por regressão linear e o residual.

Tabela 6 – TMK e tendências de variação encontradas para a ET_o diária entre 1965 e 2017 com indicação nível de significância em escala mensal

Mês	Regressão Linear ($y=ET_o$ e $x=ano$)	TMK	Tendência
Janeiro	$y = -0,0049x + 5,1724$	-0,4814	—
Fevereiro	$y = -0,003x + 5,0483$	-0,4224	—
Março	$y = 0,0005x + 4,7204$	0,1815	—
Abril	$y = -0,0019x + 4,3364$	-0,0237	—
Mai	$y = -0,0041x + 3,8955$	-0,3078	—
Junho	$y = -0,0059x + 3,6693$	-1,3336	—
Julho	$y = -0,0094x + 3,8078$	-2,0097**	↓
Agosto	$y = -0,0104x + 4,2874$	-2,9749***	↓
Setembro	$y = -0,0032x + 4,5562$	-0,5129	—
Outubro	$y = -0,0034x + 4,8925$	-1,0653	—
Novembro	$y = -0,0035x + 5,1896$	-1,2183	—
Dezembro	$y = -0,0055x + 5,2484$	-1,0022	—

*** Significativo a 1% de probabilidade

** Significativo a 5% de probabilidade

* Significativo a 10% de probabilidade

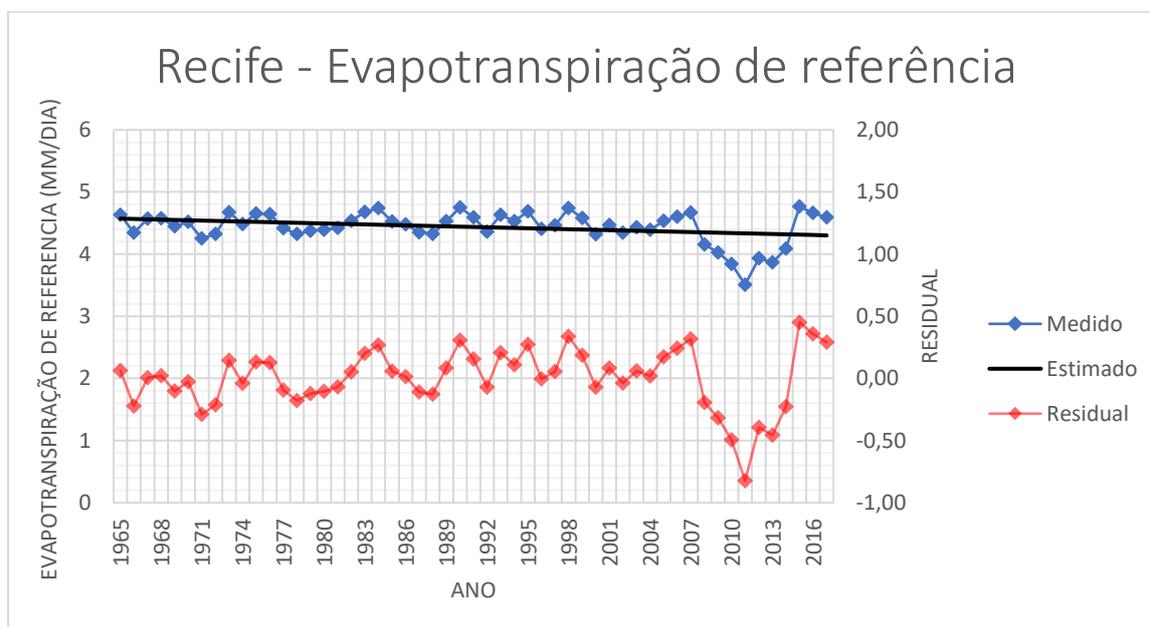
Valores sem símbolo são estatisticamente insignificantes ($Z_{1-\frac{\alpha}{2}} > |Z_{TMK}|$)

↑ Tendência de aumento (significativo a 10%)

↓ Tendência a diminuição (significativo a 10%)

Fonte: O Autor (2019).

Figura 7 - Série temporal e tendência detectada para a média anual da evapotranspiração de referência entre 1965 e 2017



Fonte: O Autor (2019).

A evapotranspiração de referência apresentou pouquíssimos resultados significativos estatisticamente, e – levando em consideração o período do estudo – apresentou uma leve diminuição nos seus resultados. Foi observado um comportamento

irregular e com grande variabilidade nos anos finais do intervalo estudado. Se encontraram apenas dois meses com alguma significância estatística no período, sendo um deles com alta significância ($\alpha = 0,01$).

Pode-se concluir que as mudanças vêm ocorrendo de forma pouco intensa e em datas épocas do ano específicas. Fica evidenciado também que a ET_o não irá obrigatoriamente seguir as tendências verificadas na temperatura, visto que no método se baseia em diversas variáveis.

4.4 Considerações finais

Tendo em vista que o desenvolvimento de Recife – assim como o do estado de Pernambuco com um todo – depende fortemente da água, torna-se necessário um estudo mais amplo neste aspecto da região do que o que já vem sendo feito. Por conta disso o presente trabalho não só modelou os valores de ET_o mas também analisou as mudanças que ocorreram na cidade através de tendências de variação desta e das principais variáveis climáticas que podem afetar significativamente os recursos hídricos.

Neste trabalho foram estudadas diversas séries de dados anuais e sazonais para a temperatura máxima e mínima diária, velocidade do vento, umidade relativa média e evapotranspiração de referência para um período de 53 anos entre 1965 e 2017 na cidade de Recife. Após o tratamento adequado nos dados – visto que houveram falhas no banco de dados do período escolhido – foi realizado o cálculo da ET_o pelo método de Penman-Monteith-FAO, é importante ressaltar que essas falhas que foram encontradas – mesmo após terem sido feitos os métodos recomendados para cada tipo – podem ter causado incerteza nos resultados, levando assim à alguma divergência com outros estudos na mesma área (como Lucas (2016), que verificou um aumento tanto de temperatura máxima quanto de temperatura mínima nos seus resultados, fato que pode estar atrelado ao ocorrido entre 2004 e 2005 no presente trabalho, visto que no do autor em questão não ocorreu esse fato), assim sendo se torna importante o aprofundamento em um estudo que proponha outras maneiras de determinar a evapotranspiração de referência, por equações mais simples – assim amenizando o problema de falta de dados – mas ainda sim de maneira satisfatória, dessa forma podendo diminuir as limitações de estudos que abrangem um longo período de tempo para uma ou mais localidades.

5 CONCLUSÕES

Foi verificado para a ET_o uma variação entre $2,30 \text{ mm. dia}^{-1}$ e $6,63 \text{ mm. dia}^{-1}$, em relação a velocidade do vento foi encontrada uma tendência altamente significativa de queda – sendo a mais acentuada dentre todos os parâmetros estudados; encontrou-se para a temperatura máxima uma leve tendência de queda, apresentando um decaimento de aproximadamente $2,59 \text{ }^\circ\text{C}$ nos 53 anos estudados – com destaque no intervalo entre 1965 e 2004 onde foi verificado um aumento – mas não muito acentuada, com uma taxa média de decrescimento ao longo do intervalo estudado de $0,0525 \text{ }^\circ\text{C. ano}^{-1}$; de forma análoga, mas ainda sim com tendências altamente significativas, para a temperatura mínima foi detectado um aumento no período do estudo sendo sua taxa de crescimento média no período do estudo de $0,0787 \text{ }^\circ\text{C. ano}^{-1}$; a umidade relativa média apresentou uma tendência de queda – também não muito acentuada – entretanto não foi tão significativa estatisticamente como a de temperatura, possuindo meses com baixa ($\alpha = 0,10$) ou nenhuma significância estatística apresentando uma taxa de queda média no período de $0,0714 \text{ \% . ano}^{-1}$. É importante ressaltar que o estado de Pernambuco apresenta grande variabilidade climática dependendo da região, portanto os resultados obtidos não são válidos para regiões além do Recife, por mais semelhante que o clima aparente ser.

Vale ressaltar que, baseado em estudos como o realizado por Mendonça et al., onde é feita uma comparação de diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência, não seriam obtidos resultados satisfatórios de evapotranspiração utilizando métodos muito simples – isso significando métodos que utilizam menos parâmetros que o PM-FAO – como por exemplo os que se baseiam apenas em temperatura do ar, caso não houvesse um ajuste adequado dos resultados obtidos de acordo com o local do estudo, sendo este Recife neste trabalho. Além do ajuste também ficou evidente como os diversos parâmetros podem influenciar na determinação da ET_o dessa forma o mais recomendado é utilizar o método que seja mais abrangente neste aspecto.

Também se nota que mesmo os parâmetros utilizados no método de PM-FAO apresentando tendências significativas estatisticamente, a ET_o não apresentou tendência significativa em escala anual – exceto dois meses que apresentaram baixa significância. Dessa forma surge o questionamento de quanto é a contribuição individual dessas variáveis no desenvolvimento das tendências na evapotranspiração de referência, assim como de que maneira cada uma delas afetaria a estimativa.

Em relação aos impactos que as mudanças observadas sugerem pode-se destacar que – apesar de não muito intensa – foi encontrada uma tendência de diminuição da ET_o para a região do Recife o que, considerando a não alteração dos coeficientes de cultura, poderia significar uma menor necessidade de água para cultivo de plantas, podendo assim armazenar mais água que pode ser usada para outros fins, visto que o controle de consumo da água é um tópico de suma importância na sociedade contemporânea. De forma geral foi observado um aumento na temperatura média da cidade podendo influenciar nos períodos de irrigação de certas culturas, dessa forma é uma boa opção um estudo mais aprofundado do momento correto da realização de certas plantações visando a melhor produtividade.

Devido a metodologia adotada no estudo em questão, foi analisado apenas o comportamento dos parâmetros até os dias atuais, mas pelo mesmo não se pode determinar como esse comportamento se dará no futuro, caso este fosse o intuito do trabalho seria necessário modelos climáticos, visto que são ferramentas utilizadas com a finalidade de supor mudanças futuras, deste forma possibilitando que haja um estudo dos seus impactos sobre o meio dos recursos hídricos. Destaca-se a importância do uso de tendências no estudo, visto que a mesma é necessária para um melhor entendimento de como o ecossistema vem reagindo às mudanças climáticas, podendo ajudar na elaboração de novas estratégias para a adaptação a estas mudanças além de um melhor planejamento de uso da água.

O método de análise de tendências utilizado no trabalho (Mann-Kendall) se mostrou eficiente na determinação da significância das tendências nas series das variáveis estudadas – para a cidade de Recife – tornando possível uma análise que correspondeu ao que se esperava durante a fase de obtenção e organização dos resultados, além de se mostrar de acordo com outros trabalhos que abordaram este tema em anos em comum para a mesma cidade.

Em suma, ainda é necessário um estudo mais aprofundado sobre as consequências das mudanças climáticas no Nordeste como um todo na área dos recursos hídricos, visando estudar a relação entre os diversos fatores que podem influenciar a demanda de água – seja essa para irrigação de plantas ou outros fins.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. Roma: FAO, 1998. v. 300, n. 9.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.
- BLACKIE, J. R.; SIMPSON, T. K. M. Climatic variability within the Balquhider catchments and its effect on Penman potential evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 145, n. 3, p. 371-387, 1993.
- BRUTSAERT, W.; PARLANGE, M. B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. **Nature**, v. 396, n. 6706, p. 30-30, 1998.
- CHEN, D. et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, v. 28, n. 2, p. 123-132, 2005.
- IPCC. **Climate change 2014**: synthesis report: Contribution of the three Working Groups to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, SWI, 2014.
- DELGADO, E. A. *et al.* Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB)**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.
- DOLMAN, A. J. A note on a really-averaged evaporation and the value of the effective surface conductance. **Journal of Hydrology**, v. 138, n. 3, p. 583-589, 1992.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO**, 1977
- DOUGLAS, E. M. *et al.* Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. **Journal of Hydrology**, p. 90-105, 2000.
- GAO, G. et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, v. 112, n. D11, 2007.
- GOLUBEV, V. S. et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 13, p. 2665-2668, 2001.
- GROPPO, J. D. *et al.* Trend analysis of water quality in some rivers with different degrees of development within the Sao Paulo State, Brazil. **Rivers Research and Applications**, v. 1, p. 1-2, 2008.
- GRUNDSTEIN, Andrew. Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. **Climatic Change**, v. 93, n. 1-2, p. 103-115, 2009.

GUNASEKARA, N. K. *et al.* Water Conflict Risk due to Water Resource Availability and Unequal Distribution. **Water Resources Management**, v. 28, n. 1, p. 196-184, 2013.

HOBBS, M. T.; RAMÍREZ, J. A.; BROWN, T. C. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous US: Paradoxical or complementary?. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 13, 2004.

HOWDEN, S. M. *et al.* **Adapting agriculture to climate change**. PNAS, v.104, n.50, p.19691-19696, 2007.

HUO, Z. *et al.* Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 24-34, 2013.

IRMAK, S. *et al.* Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska– USA. **Journal of Hydrology**, v. 420, p. 228-244, 2012.

KARMESHU, N. **Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test - A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States**. 2012. Master (Environmental Studies Capstone Projects) - Department of Earth and Environmental Science, University of Pennsylvania. Pennsylvania, 2012.

LACERDA, F. F. *et al.* Um Estudo de Detecção de Mudanças Climáticas no Semiárido de Pernambuco. **Simpósio Internacional De Climatologia**, Canela, RS, 2009.

LEMOS FILHO, L. C. A. *et al.* Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 12, p. 1294–1303, 2010.

LIU, B. *et al.* A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955– 2000. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, v. 109, n. D15, 2004.

LIU, C.; ZENG, Y. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin. **Water International**, v. 29, n. 4, p. 510-516, 2004.

LUCAS, E. P. C. Tendências de mudança em variáveis climáticas e evapotranspiração de referência em período de 40 anos (1975-2014) no estado de Pernambuco. **Trabalho de conclusão de curso (UFPE)**, 2016.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas, Condições Meteorológicas Extremas e Eventos Climáticos no Brasil**. FBDS - Mudanças Climáticas Eventos Extremos no Brasil. p. 5-19, 2010.

MATZENAUER, R. *et al.*, **Relações entre a Evapotranspiração do milho e as formulas de Penman e Thornthwaite** - Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 18(11), p. 1207-1214, novembro, 1983.

MEDEIROS, Y.D.P. Análise dos Impactos das Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 127-136, 2003.

- MENDES, R. de S. Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura da soja para o Distrito Federal. **Dissertação (Mestrado)**, Brasília, Distrito Federal, 2006.
- MENDONÇA, J. C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.275-279, 2003.
- MOONEN, A. C. et al. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 111, n. 1, p. 13-27, 2002.
- MORAES, J. M. *et al.* Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. **Water Resources Management**. p. 295-311, 1998.
- NEETI, N.; EASTMAN, J. R. A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. **Transactions in GIS**, p. 599-611, 2011.
- NOBRE, P. **Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro. Desertificação e Mudanças Climáticas no Semiárido Brasileiro.** Campina Grande, PB: Insa-PB. p. 25-35, 2011.
- PETERSON, T. V. Evaporation losing its strength. **Nature**, v. 377, p. 687-688, 1995.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Campinas, 1985
- RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. **International Journal of Climatology**, v. 24, n. 9, p. 1077-1090, 2004.
- RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. **Science**, v. 298, n. 5597, p. 1410-1411, 2002.
- RUSSO, David. A Geostatistical Approach to the Trickle Irrigation Design in a Heterogeneous Soil 1. **Water Resources Research**, v. 19, n. 3, p. 632-642, 1983.
- SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016.
- SANTOS, D. C. *et al.* **Estimativa do balanço hídrico climatológico em Recife-PE.** In: COLOQUIO TECNOLOGIA AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 1. Recife: ITEP, 2013.
- SANTOS, P. V.; SANTOS, R.; COUTINHO, M. D. L. Detecção de mudanças climáticas através de índices pluviométricos diários no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 4, p. 713-731, 2013.
- SANTOS, S.; ASSIS, J. M. O.; SOUZA, W. M. Tendências de Mudanças Climáticas na Bacia do Rio Una, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 2, p. 243-257, 2014.

- SERRA FILHO, R. *et al.* Levantamento da cobertura vegetal natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, v.11, p.1-56, 1975.
- SILVA, R. O. B. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica no estado de Pernambuco. 94 p. **Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco**. Recife, 2013.
- SOUZA, W. M.; AZEVEDO, P. V. Índices de Detecção de Mudanças Climáticas Derivados da Precipitação Pluviométrica e das Temperaturas em Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 143-159, 2012.
- STRECK, N. A. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.2, p.424-433, 2006.
- THOMAS, A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. **International Journal of Climatology**, v. 20, n. 4, p. 381-396, 2000.
- TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **RBRH**, v. 7, n. 1, p. 5-27, 2002.
- YUE, S. *et al.* Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, p. 254-271, 2002.
- ZHANG, W. *et al.* Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. **Global and Planetary Change**, p. 35-47. 2009.
- ZHANG, Y. *et al.* Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)**, v. 112, n. D12, 2007.