



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS AGROINDUSTRIAIS**

**AUTOR: IURY ARAUJO MACÊDO DANTAS**

**ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS USANDO A  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA EM REGIÃO  
SEMIÁRIDA**

**Pombal - PB  
Julho - 2015**

**IURY ARAUJO MACÊDO DANTAS**

**ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS USANDO A  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA EM REGIÃO  
SEMIÁRIDA**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Campina  
Grande, Centro de Ciências e  
Tecnologia Agroalimentar, Programa  
de Pós-Graduação STRICTO  
SENSU, como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do  
Título de Mestre em Sistemas  
Agroindustriais.

**Orientador: Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz**

**Pombal - PB  
Julho - 2015**

Iury Araujo Macêdo Dantas

ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS USANDO A  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DIÁRIA EM REGIÃO  
SEMIÁRIDA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia  
Agroalimentar, Programa de Pós-Graduação  
STRICTO SENSU, como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do Título de Mestre  
em Sistemas Agroindustriais.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz  
Orientador  
(UFCG/Campus de Pombal)

---

Prof. Dr. Walker Gomes de Albuquerque  
Examinador interno  
(UFCG/Campus de Pombal)

---

Prof. Dr. Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira  
Examinador interno  
(UFCG/Campus de Pombal)

---

Prof. Dr. Ednaldo Barbosa Pereira Júnior  
Examinador externo  
(IFPB/Campus de Sousa)

Apresentada em 22 de julho de 2015

**Pombal - PB**  
**Julho - 2015**

## DEDICATÓRIA

*Dedico primeiramente aos meus pais, Iraildo Macêdo Dantas e Francisca Elisa de Araujo Macêdo Dantas, onde sem a ajuda dos mesmos não teria como estar alcançando essa conquista. Como também a minha irmã, Isys Araujo Macêdo Dantas e a toda minha família, as quais sempre me apoiaram e torceram pelo meu sucesso, onde alguns perto e outros longe, mas acreditam e me incentivam.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, **Iraildo Macêdo Dantas** e **Francisca Elisa de Araujo Macêdo Dantas**, pela educação e ensinamentos que me passaram, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e por todo amor e carinho que sempre me ofereceram.

A minha irmã, **Isys Araujo Macedo Dantas** e a toda família por estarem sempre comigo em todos os momentos.

A minha namorada, **Gabriela Braga de Sá** pelo incentivo e coragem passadas.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz** pela orientação, ensinamentos, conselhos e paciência para a realização deste trabalho.

Ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - CCTA, da **Universidade federal de Campina Grande**, *Campus* de Pombal-PB e a todos os professores do Mestrado em Sistemas Agroindustriais - PPGSA.

## RESUMO

A falta d'água no semiárido brasileiro muitas vezes tornou-se fator limitante para desenvolvimento urbano, agrícola e industrial, interferindo diretamente na vida e renda das pessoas. Este trabalho teve como objetivo determinar o índice de reconhecimento de secas em região semiárida nordestina, usando como referência a evapotranspiração potencial diária obtida através do método Penman-Monteith (FAO) e de dados meteorológicos observados na bacia do Piancó-Piranhas-Açu para um período de 23 anos, esses dados foram adquiridos na estação meteorológica do INMET localizada no Perímetro Irrigado de São Gonçalo-Sousa-PB, com isso foi comparado com os métodos de Thornthwaite, Hargreaves e Blaney-Cridde, para períodos anuais, semestrais, trimestrais e mensais. Onde seus impactos foram calculados usando os métodos estatísticos da Raiz do Erro Quadrado Médio e a Média de Erro de Bias. Onde nove dos 23 anos foram detectados com seca. Semestralmente a seca mais forte aconteceu no segundo semestre, sendo classificada como seca de classes extremas, separado por trimestre os dois últimos apresentaram secas mais fortes, enquanto que mensalmente seus índices são bem próximos, em sua maior parte os resultados equivalente a anos de seca mais severa, iniciando no mês de maio. O método Thornthwaite foi o que mais se aproximou do método de referencia, sendo o mais indicado para ser usado na região, onde o mesmo é de fácil estimação necessitando somente de dados meteorológicos (temperatura).

Palavras-chave: água; seca; dados meteorológicos.

## ABSTRACT

The water shortage in the Brazilian semiarid often became a limiting factor for urban, agricultural and industrial development, directly interfering with life and income of people. This study aimed to determine the dry recognition index in northeastern semiarid region, with reference to the daily potential evapotranspiration obtained by the Penman-Monteith method (FAO) and meteorological data observed in the basin of Piancó-Piranhas-Açu for a period 23, these data were acquired in the meteorological station of INMET located in the Irrigated Perimeter of São Gonçalo, Sousa-PB, with this was compared with the methods of Thornthwaite, Hargreaves and Blaney-Criddle, for annual, semi-annual, quarterly and monthly periods . Where its impacts were calculated using statistical methods of Mean Square Error Root and Bias Error Ages. Where nine of the 23 years were detected with dry, semi-annually the most severe drought occurred in the second half, being classified as dry extreme classes, separated by a quarter the last two were more severe droughts, while monthly its contents are very close in their Most of the results equivalent to more years of severe drought, starting in May. The Thornthwaite method was the one closest to the reference method, the most suitable for use in the region, where it is easy pet needing only meteorological data (temperature).

Keywords: water; drought; meteorological data.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Estação Meteorológica do INMET	22
Figura 2 - Parâmetros meteorológicos do local de estudo referente: (a) resultados da declinação solar diária, (b) resultados do fotoperíodo, (c) resultados da radiação extraterrestre, (d) resultados da radiação global, (e) resultados do balanço de radiações de ondas curtas e (f) resultados do balanço de radiações de ondas longas.	34
Figura 3 - Relação precipitação e desvio padrão	35
Figura 4 - Comparação entre os métodos de evapotranspiração	36



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classificação climática de acordo com o índice de seca	16
TABELA 2 - Classificação do índice de Porcentagem Normal	17
TABELA 3 - Classificação do índice de Precipitação Padronizada	18
TABELA 4 - Classificação do Índice de Seca de Bhalme & Mooley	18
TABELA 5 - Classificação do Índice de Recuperação de Seca	19
TABELA 6 - Classificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)	19
TABELA 7 - Coeficientes (a, b) para estimativa da evapotranspiração de referência ( $EP_o$ ) a partir da fórmula de blaney-cridle, em função da umidade relativa do ar (U), da razão de insolação (n/N) e da média diária da velocidade do vento ( $U_2$ )	30
TABELA 8 - Classificação de acordo com o índice de seca	39
TABELA 9 - Avaliação de desempenho através de indicadores estatísticos	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre precipitação e métodos de evapotranspiração potencial	37
Gráfico 2 - RDI anual	38
Gráfico 3 - RDI semestral de janeiro a junho	39
Gráfico 4 - RDI semestral de julho a dezembro	40
Gráfico 5 - RDI trimestral de janeiro a março	41
Gráfico 6 - RDI trimestral de abril a junho	41
Gráfico 7 - RDI trimestral de julho a setembro	42
Gráfico 8 - RDI trimestral de outubro a dezembro	43
Gráfico 9 - RDI mensal	44

## SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
ASA	Articulação no Semiárido Brasileiro
BOC	Balanço de Ondas Curtas
BOL	Balanço de Ondas Longas
ETP	Evapotranspiração Padrão
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MBE	Média de Erro de Bias
OMM	Organização Meteorológica Mundial
RMSE	Raiz do Erro Quadrado Médio
RDI	Índice de Reconhecimento de Secas
TMG	Temperatura Meridiano de Greenwich

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1. GERAL	14
2.2. ESPECÍFICOS	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
3.1 MONITORAMENTO DE SECA	15
3.2 ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS	16
3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	20
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>22</b>
4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
4.2 DADOS METEOROLÓGICOS	22
<b>4.2.1 Temperaturas compensada média</b>	<b>23</b>
<b>4.2.2 Cálculo da Declinação Solar</b>	<b>23</b>
<b>4.2.3 Cálculo do Fotoperíodo</b>	<b>24</b>
<b>4.2.4 Constante Solar</b>	<b>25</b>
<b>4.2.5 Radiação extraterrestre</b>	<b>25</b>
<b>4.2.6 Estimativa da Radiação Global</b>	<b>26</b>
<b>4.2.7 Balanço de Radiação</b>	<b>26</b>
4.3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	27
<b>4.3.1 Método de Penman-Monteith (FAO - 1991)</b>	<b>27</b>
<b>4.3.2 Método de Thornthwaite</b>	<b>28</b>
<b>4.3.3 Método de Hargreaves &amp; Samani</b>	<b>28</b>
<b>4.3.4 Método de Blaney-Criddle</b>	<b>29</b>
4.4 AVALIAÇÃO DA GRAVIDADE DA SECA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS	30
4.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DE INDICADORES ESTATÍSTICOS	31
4.6 CÁLCULOS DOS VALORES	32
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>33</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil apesar de possuir as maiores reservas de água doce do mundo apresenta problemas com sua distribuição, onde as maiores concentrações populacionais ficam longe dessas grandes fontes hídricas. É o caso do polígono das secas, onde está geograficamente localizado em região semiárida.

Na região mais árida do País água se tornou fator limitante para o desenvolvimento urbano, agrícola e industrial, sendo necessário repensar todo seu sistema de gestão, a exemplo do reuso, reutilização, formas mais eficientes de tratamentos e redução do desperdício, no intuito de se evitar racionamentos.

O semiárido brasileiro abrange uma área de 969.589,4 km<sup>2</sup>, compreende 1.133 municípios de nove estados do Brasil, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, onde vivem cerca de 22 milhões de pessoas que representam 11,8% da população brasileira, e predomina o bioma caatinga (IBGE, 2010).

Nessa região notam-se problemas de distribuição e regularidade de chuvas, de maneira semelhante ao observado em outras regiões semiáridas. Tal condição interfere, diretamente, na vida e na renda das pessoas. Além dessa irregularidade, o mesmo geralmente apresenta-se no curto período de tempo situado em alguns meses, onde a maioria das chuvas é de curta duração e grande intensidade, resultando no preenchimento da maioria dos reservatórios.

Outra característica do Semiárido brasileiro é o déficit hídrico. Mas não significa falta de água, em comparação com outros semiáridos no mundo, é o mais chuvoso, com uma precipitação pluviométrica entre 200 mm a 800 mm anuais, dependendo da região. Contudo, as chuvas são irregulares no tempo e no espaço. Além disso, a quantidade de chuva é menor do que o índice de evapotranspiração, que é de 3 mil mm/ano, ou seja, a evaporação é maior que o triplo da chuva que cai (ASA, 2014).

Tentando suavizar os efeitos do espaçamento referente ao déficit hídrico foram construídas, durante anos, muitas formas de gerenciamento de água, como: açudes, lagos, poços, rios perenizados, entre outros. Alguns desses métodos apresentam problemas em relação ao bom acondicionamento dessa água, pois estando diretamente exposta aos raios solares a mesma esquenta rapidamente e é levada para outras áreas, por meio da evapotranspiração.

Apesar de não existir uma definição universal para seca, a mesma, na região semiárida, tem característica periódica, consequentemente causando prejuízos entre os diferentes setores da atividade humana, sendo difícil de detectar o seu início e a monitoração correta. Ocorre em qualquer região climática e suas características consistem em situações de escassez de água por um período de longa duração, porém temporária, ocorrendo principalmente devido a um déficit entre a precipitação pluvial e evapotranspiração potencial. O aumento da gravidade das secas ocorre devido à redução da quantidade de precipitação pluvial associados aos fatores climáticos como temperatura do ar elevada, ventos fortes e baixa umidade do ar, além de condições locais de solo, como a capacidade reduzida para retenção de água e erosão (SALAS et al. 2005).

Em suma é importante prever e identificar esse fenômeno principalmente pela periodicidade com o qual se repete para isso existe diversas metodologias de identificação de seca, porém há necessidade de utilizar procedimentos de identificação que considere o balanço de entrada e saída de água no sistema (precipitação e evapotranspiração), como o Índice de Reconhecimento de Seca (RDI).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. GERAL**

Aplicar o índice de reconhecimento de secas (RDI) para identificação de períodos de secas na região semiárida nordestina, usando como referência a evapotranspiração potencial diária obtida através do método Penman-Monteith (FAO), a partir de dados meteorológicos observados na bacia do Piancó-Piranhas-Açu.

### **2.2. ESPECÍFICOS**

- Obter a série histórica de dados meteorológicos da região;
- Estimar a evapotranspiração através dos métodos de: Penman-Monteith; Thornthwaite; Hargreaves & Samani; Blaney-Criddle;
- Determinar o Índice de Reconhecimento de Secas (RDI) a partir dos dados meteorológicos obtidos na estação meteorológica do INMET localizada na região São Gonçalo-Sousa-PB;

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 MONITORAMENTO DE SECA**

Precipitação pluviométrica ou chuva é o processo pelo qual a água condensada na atmosfera atinge gravitacionalmente a superfície terrestre.

Essa chuva em grande intensidade e reduzido intervalo de tempo provoca muitos problemas como cheias, alagamentos, causa danos às estruturas de barragens, problemas com doenças e vetores de veiculação hídrica, entre outros. Já a ausência da chuva por longos períodos reduz a vazão dos rios provocando danos ao ambiente, diminuindo sua capacidade de diluição de poluentes, como também reduz a disponibilidade de água para outros usos como abastecimento, irrigação, geração de energia, etc.

Para a realidade do semiárido trabalha-se com períodos de escassez de água, onde a maior parte do ano é seco com um período chuvoso irregular e de curta duração.

Para CUNHA (2008), seca é um fenômeno natural, complexo, de carácter recorrente e não aleatório, de origem meteorológica e climatológica podendo ou não resultar em desastre natural (catástrofe natural).

A seca é basicamente um fenômeno físico que se caracteriza pela restrição pluviométrica, ou seja, reduzida precipitação, provocando muitas vezes prejuízos aos ecossistemas e as atividades socioeconômicas.

Na visão de SANTOS (2012), seca está intimamente associada à penúria, à fome, ao êxodo rural, aos carros pipas e às frentes de serviço. Para o camponês nordestino, seca e catástrofe social são sinônimas.

TSAKIRIS (2007) desenvolveu um trabalho para avaliar a Seca Regional baseado no RDI (Índice de Reconhecimento de Secas), nas bacias do rio Mornos, localizada no centro da Grécia e na Bacia Nestos, localizada na fronteira entre Bulgária e Grécia.

ZARCH (2011) realizou um trabalho de monitoramento de secas no Irã, através do RDI, usando dados referentes às estações meteorológicas e equação de Penman–Monteith, no período de 30 anos. Em geral, os resultados demonstraram que a maior parte do Irã foi afetada pela seca, mas a gravidade e aumento da frequência deste fenômeno foram vistos nas partes central e oriental do país.



### 3.2 ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS

O índice de Seca, elaborado por Thornthwaite (1948) e ajustado posteriormente por PENMAN (1953), calcula a diferença entre a quantidade de chuva e a perda de água do sistema, ou seja, a evapotranspiração. Neste cálculo, a evapotranspiração foi utilizada a partir do momento em que se percebeu o caráter decisivo deste parâmetro na determinação de um clima (BARROS, 2010).

Os valores positivos do Índice de Reconhecimento de Secas padronizado ( $RDI_{st}$ ) indicam períodos úmidos, enquanto os valores negativos indicam períodos de seca em comparação com as condições normais da área, como pode ser visto na Tabela 1.

TABELA 1 - Classificação climática de acordo com o índice de seca

<b>Classes Climáticas</b>	<b>Índice de Seca</b>
Leve	-0,5 a -1,0
Moderado	-1,0 a -1,5
Grave	-1,5 a -2,0
Classes Extremas	< -2,0

Fonte: VANGELIS (2013)

Outros índices de Seca também são utilizados na literatura como o índice de Porcentagem Normal (PN) que é calculado de forma simples e serve bem às necessidades de previsores do tempo e do público em geral. Esse índice é baseado na precipitação, que é facilmente medida em diversos locais. Tais análises são eficazes quando usadas para uma única região ou uma única estação.

Uma desvantagem potencial de se usar esse índice é quanto à distribuição da precipitação no período considerado não obedece a uma distribuição normal.

Verifica-se na Tabela 2 a classificação dos valores do índice de Porcentagem Normal divididos em onze categorias variando de  $\geq 100\%$  a  $90\%$  extremamente úmido a  $-90\%$  a  $\leq -100\%$  seca extrema.

TABELA 2 - Classificação do índice de Porcentagem Normal

<b>PN</b>	<b>Classificação</b>
≥100% a 90%	Extremamente úmido
70% a 89,9%	Umidade alta
50 a 69%	Umidade moderada
30% a 49,9%	Umidade baixa
10% a 29,9%	Umidade inicial
-9,9% ≤ 0 ≤ 9,9%	Normal
-10% a 29,9%	Seca inicial
-30% a 49,9%	Seca suave
-50% a 69,9%	Seca moderada
-70% a 89,9%	Seca severa
-90% a ≤ -100%	Seca extrema

Fonte: FERNANDES (2009)

Já o Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index - SPI*) é calculado para qualquer local baseado no registro de precipitação de longo prazo ajustado a uma distribuição de probabilidade. Os valores positivos de SPI indicam a precipitação maior do que a mediana ou média e os valores negativos indicam precipitações menores que a mediana ou média. Períodos úmidos também são monitorados com esse índice.

Para o cálculo do SPI utiliza-se uma base de dados de precipitação com pelo menos 30 anos, sendo ajustado por meio da distribuição gama, que posteriormente é transformada em uma distribuição normal, onde pode ser observados na Tabela 3 valores de classificação do índice com valores variando de  $\geq 2,00$  a  $\leq -2,00$  e suas respectivas classificações entre extremamente úmido e extremamente seco.

TABELA 3 - Classificação do índice de Precipitação Padronizada

<b>SPI</b>	<b>Classificação</b>
$\geq 2,00$	Extremamente úmido
1,00 a 1,99	Muito úmido
0,50 a 0,99	Moderadamente úmido
0,49 a -0,49	Próximo ao normal
-0,50 a -0,99	Moderadamente seco
-1,00 a -1,99	Muito seco
$\leq -2,00$	Extremamente seco

Fonte: FERNANDES (2009)

Bhalme e Mooley desenvolveram o Índice de Seca de Bhalme & Mooley (BMDI) para avaliar a intensidade de seca usando somente a precipitação, onde os valores para sua classificação estão presentes na Tabela 4.

TABELA 4 - Classificação do Índice de Seca de Bhalme &amp; Mooley

<b>BMDI</b>	<b>Classificação</b>
$\geq 4,00$	Extremamente úmido
3,00 a 3,99	Umidade alta
2,00 a 2,99	Umidade moderada
1,00 a 1,99	Umidade leve
0,99 a -0,99	Próximo ao normal
-1,00 a -1,99	Seca leve
-2,00 a -2,99	Seca, moderada
-3,00 a -3,99	Seca severa
$\leq -4,00$	Extremamente seco

Fonte: FERNANDES (2009)

Outro índice de seca encontrado na literatura é o de Reparação de Seca (SPI), onde é calculado em nível da bacia de rio incorporando a temperatura, bem como a precipitação, evaporação, neve, fluxo em superfície e níveis de reservatório como dados de entrada (WEGHORST, 1996). Seus valores de RDI variam de acima de 4,0 ou mais a -4,0 ou menor Tabela 5.

TABELA 5 - Classificação do Índice de Recuperação de Seca

<b>RDI</b>	<b>Classificação</b>
4,0 ou mais	Extremamente úmido
1,5 a 4,0	Moderadamente úmido
1 a 1,5	Normal para meio úmido
0 a -1,5	Normal para meio seco
-1,5 a -4,0	Moderadamente seco
-4,0 ou menor	Extremamente seco

Fonte: FERNANDES (2009)

Já o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) é um índice de umidade de solo desenvolvido para regiões homogêneas, através do qual se mede a perda e a demanda de fornecimento de umidade do solo (PALMER, 1965).

O índice é calculado utilizando como dados de entrada todos os termos da equação do balanço hídrico, incluindo evapotranspiração, escoamento, recarga do solo e perda de umidade na camada de superfície. Palmer desenvolveu o PDSI para incluir a duração de uma seca ou um período de umidade. Onde pode ser visualizada na Tabela 6 a classificação variando entre extremamente úmido a seca extrema e os valores  $\geq 4,00$  a  $\leq -4,00$ .

TABELA 6 - Classificação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI)

<b>PDSI</b>	<b>Classificação</b>
$\geq 4,00$	Extremamente úmido
3,00 a 3,99	Umidade alta
2,00 a 2,99	Umidade moderada
1,00 a 1,99	Umidade baixa
0,50 a 0,99	Umidade inicial
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca inicial
-1,00 a -1,99	Seca suave
-2,00 a -2,99	Seca, moderada
-3,00 a -3,99	Seca severa
$\leq -4,00$	Seca extrema

Fonte: Fernandes (2009)

### 3.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Segundo SHUTTLEWORTH (1948), desde os primórdios da civilização o homem percebeu haver estreita relação entre o secar de uma superfície molhada e as condições do ambiente. Sabia-se que em dias ensolarados, com ar seco, a velocidade de secar é maior.

Para ALLEN et al. (1998), evapotranspiração é a combinação dos dois processos separados pelo qual a água é perdida da superfície do solo por evaporação e por outro lado a partir da cultura por transpiração.

Segundo CARVALHO (2011), evapotranspiração potencial é caracterizada através da transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera.

Essa evapotranspiração pode ser estimada por diversos métodos, como o método de medidas usando os evaporímetros: Tanque Classe A, Atmômetro Piche etc. E métodos de estimativa, como o aerodinâmico, o Método de Hargreaves, Método de Thornthwaite, Método de Blaney e Criddle, entre outros.

CARDOSO (2014) usou a equação de Penman-Monteith para analisar a distribuição espacial dos componentes da evapotranspiração de referência modificada (ETr) no Brasil, o objetivo foi estudar para o período atual (1980-2000) e simular para o futuro (2080-2100), as componentes da evapotranspiração de referência modificada (ETr), com base no cenário futuro, os níveis de CO<sub>2</sub> alcançando 757 ppm e considerando as diferentes condições meteorológicas resultantes de uma simulação climática regional a partir de um modelo de interação clima-vegetação. Os termos aerodinâmico e radiativo apresentaram um ciclo anual que é dominante na região amazônica e Sul do Brasil, enquanto na região sudeste o ciclo semestral tem maior destaque. As maiores variações na amplitude da ETr foram identificadas no semiárido nordestino e no extremo sul do Brasil. As mudanças na ETr, devido ao aquecimento global, foram máximas na região central do Brasil e amazônica.

VESCOVE e TURCO (2013) compararam três métodos de estimativa da ETP: Radiação Solar (RS), Makkink (MAK) e Tanque Classe A (TCA) em relação ao método de Penman-Monteith (PM), em dois períodos distintos das fases de desenvolvimento da cultura de citros, com dados médios quinzenais para os períodos inverno-primavera e verão-outono. A pesquisa foi desenvolvida em uma fazenda de citros, em Araraquara – SP, onde foi instalada uma estação meteorológica automatizada e um tanque Classe A. Resultando que o método do

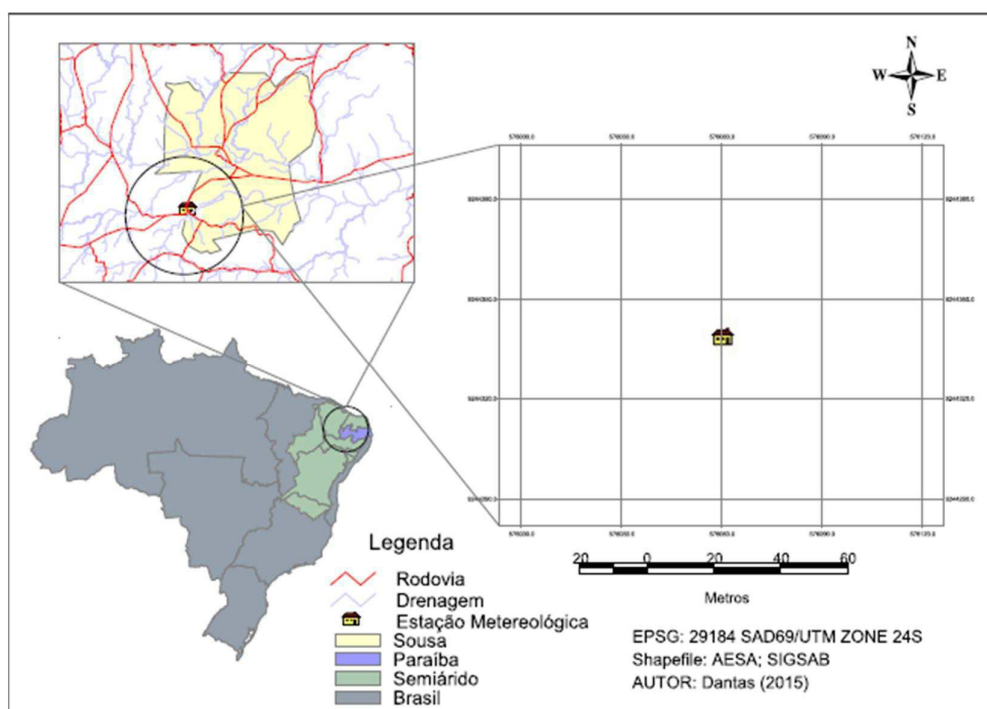
TCA superestimou a ETP em 26% no período verão-outono e em 24% no período inverno-primavera. O método de MAK subestimou a ETP nos dois períodos analisados, enquanto o método da RS superestimou a ETP.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo restringiu-se ao Semiárido brasileiro, através de dados referentes à Estação Meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada na Bacia Piancó-Piranhas-Açu, no Perímetro Irrigado de São Gonçalo-Sousa-PB (-6 50' 09,6100" e -38 18' 40,57000") como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da Estação Meteorológica do INMET



Fonte: Autor (2015)

### 4.2 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram adquiridos na estação meteorológica do INMET. Os cálculos levaram em conta uma série histórica do Perímetro Irrigado de São Gonçalo de 23 anos, onde são respectivamente: 1962, 1963, 1964, 1965, 1969, 1970, 1973, 1974, 1975, 1976, 1978, 1981, 1995, 1996, 1999, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012 e 2013.

O banco de dados citado dispõem de dados de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima, insolação, evapotranspiração piche, temperatura compensada média, umidade relativa média e velocidade do vento média. Desses dados apenas os relativos à evaporação de piche não foram utilizados neste trabalho.

#### 4.2.1 Temperaturas compensada média

No Brasil, a temperatura média diária do ar em cada estação meteorológica da rede oficial é geralmente estimada através de um parâmetro que se convencionou chamar de "temperatura compensada". Para seu cálculo empregou-se a Equação 1 (SERRA, 1974):

$$t = \frac{(2t_{00} + t_{12} + t_x + t_N)}{5} \quad (1)$$

Em que:  $t_{00}$  e  $t_{12}$  referem-se, respectivamente, às temperaturas observadas às 00 e às 12 Temperatura Meridiano de Greenwich (TMG),  $t_x$  traduz a temperatura máxima do dia em questão e  $t_N$  específica a temperatura mínima desse mesmo dia.

#### 4.2.2 Cálculo da Declinação Solar

O valor de R, que corresponde a relação entre a distância (D) Terra-Sol em um determinado dia e a distância média terra-sol, foi calculado a partir da Equação 2.

$$R = 1 - 0,0009464 \sin(F) - 0,01671 \cos(F) - 0,0001489(2F) - 0,00002917 \sin(3F) - 0,0003438 \cos(4F) \quad (2)$$

Muito embora a declinação do Sol varie continuamente com o tempo, foi considerada como se fosse uma função discreta, assumindo-se que o valor não muda ao longo de um dia.

Sendo usada a Equação 3 para o cálculo bem aproximado da declinação do sol ( $\delta$ ), como recomendada por Won (1977).

$$\delta = 0,3964 + 3,631 \sin(F) - 22,97 \cos(F) + 0,03838 \sin(2F) - 0,3885 \cos(2F) + 0,07659 \sin(3F) - 0,1587 \cos(3F) - 0,01021 \cos(4F) \quad (3)$$

Sendo F (calculado em graus) a fração angular do ano correspondente à data escolhida ( $D = 1, \dots, 365$ ), a qual é determinada pela Equação 4.



$$F = \frac{360^\circ D}{365} \quad (4)$$

#### 4.2.3 Cálculo do Fotoperíodo

O fotoperíodo é calculado a partir da primeira hora de sol até o seu anoitecer (Equação 5), o centro do disco solar situa-se no plano do horizonte do observador e, assim, o ângulo zenital é de  $90^\circ$  ( $\cos Z = 0$ ). O mesmo se verifica por ocasião do pôr do Sol.

$$\cos \varphi \cos \delta \cos H = -\sin \varphi \sin \delta \quad (5)$$

Aqui H traduz o valor assumido pelo ângulo horário (h) para representar o ângulo que a Terra deve girar, a partir do instante do nascimento até o por do Sol. É evidente que do nascimento do Sol até seu entardecer a Terra também deve girar H graus. Desse modo, entre o nascer e o ocaso do Sol o ângulo horário total será 2H. Verifica-se que, para uma dada latitude ( $\varphi$ ) e data, o ângulo horário (H) fica univocamente determinado. Para o cálculo do ângulo horário foi usada a (Equação. 6):

$$H = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (6)$$

Por outro lado, sabe-se que o fotoperíodo (N) representa o intervalo de tempo que transcorre entre o nascimento e o ocaso do Sol, ou seja, o tempo necessário para a Terra efetuar um arco de  $2H^\circ$ . Esse intervalo é obtido através da velocidade angular da terra  $15^\circ \text{h}^{-1}$ , sendo  $N = 2H/15$  horas pela Equação 7.

$$N = \frac{2H}{15} = \left[ \frac{2}{15} \right] \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta) \quad (7)$$

Como os cálculos foram realizados levando em conta o nascimento e ocaso do sol, assumindo que o surgimento e o anoitecer ocorrem quando o bordo superior do disco solar aparentemente tangência o plano do horizonte local, a equação tem que ser ajustada. Como o raio do disco solar subtende um ângulo de  $16'$  e a refração atmosférica torna o bordo desse disco visível quando ainda se encontra  $34'$

abaixo do plano do horizonte (LIST, 1971). Assim, a correção a ser aplicada é de 50' pela manhã e 50' à tarde como está na Equação 8.

$$N = \left[ \frac{2}{15} \right] [0,830 + \text{arc. cos}(-\text{tg } \varphi \cdot \text{tg } \delta)] \quad (8)$$

#### 4.2.4 Constante Solar

Denomina-se constante solar à quantidade de energia proveniente do Sol que na unidade de tempo é interceptada por uma superfície plana de área unitária, perpendicular à direção dos raios solares e situada fora da influência da atmosfera, a uma distância do Sol igual à distância média Terra-Sol. Para o cálculo da constante solar, usou-se a Equação 9.

$$J_0 = 1,98 \pm 0,02 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

A irradiância na superfície horizontal foi estimada usando a Equação 10.

$$Q_0 = \left( \frac{1440 J_0}{\pi R^2} \right) (H \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta + \text{cos } \varphi \text{ cos } \delta \text{ cos } H) \quad (10)$$

A Equação 10 fornece  $Q_0$  em  $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  quando a constante solar for dada em  $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . No termo  $H \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta$ ,  $H$  deve ser expresso em radianos. Para sua elaboração a constante solar ( $J_0$ ) foi tomada como  $1,98 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

#### 4.2.5 Radiação extraterrestre

Chama-se radiação extraterrestre à diferença entre os ganhos (fluxos descendentes) e as perdas (fluxos ascendentes) radiativas. Os ganhos estão representados pela radiação global ( $Q$ ) e pela radiação infravermelha emitida da atmosfera ( $R_A$ ) para a superfície, as perdas são a radiação refletida ( $Q_R$ ) e a emitida ( $R_S$ ) pela própria superfície terrestre. Assim, em certo intervalo de tempo como mostra a Equação 11.

$$R_n = (Q - Q_R) + (R_A - R_S) \quad (11)$$

Em que:  $R_n$  indica o saldo de radiação que é colocado à disposição da superfície, e usado no aquecimento, na fotossíntese e como calor latente. Normalmente  $R_n$  (chamado de "radiação líquida") pode ser expresso em  $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . A equação anterior pode assumir a seguinte forma como mostra a EQ. 12:

$$R_n = Q(1 - \alpha) + (R_A - R_S) \quad (12)$$

em que:  $\alpha$  designa o albedo da superfície, isto é, a fração da radiação global que é refletida.

#### 4.2.6 Estimativa da Radiação Global

A radiação global foi estimada através da Equação 13, onde é possível calculá-la através dos dados de insolação.

$$\frac{Q_g}{Q_0} = a + b \left( \frac{n}{N} \right) \quad (13)$$

Em que:  $Q_g$  e  $n$  representam a radiação global e a insolação medidas,  $Q_0$  e  $N$  são as radiações incidentes na ausência de atmosfera e o fotoperíodo respectivamente,  $a$  e  $b$  indicam os coeficientes de regressão. Onde foi usado valores diários para os quocientes  $Q/Q_0$  e  $n/N$  estabelecendo, assim, coeficientes (climatológicos) mensais.

Os valores respectivos anuais de  $a$  e  $b$  foram obtidos segundo AZEVEDO *ET AL.* (1981), respectivamente 0,29 e 0,40.

#### 4.2.7 Balanço de Radiação

O balanço de radiação de ondas curtas na superfície foi calculado estimando a irradiância solar global diária ( $Q_g$ ) e o coeficiente de reflexão para a superfície  $r$  foi usando o valor 0,25% onde foi estabelecido um valor intermediário entre a faixa permitida pertencente entre os valores 20 a 30% para a superfície gramada (PEREIRA, 2007), aplicando esses valores na Equação 14. O balanço de ondas longas diário por sua vez foi estimado através de valores meteorológicos adquiridos na estação e usando-os na Equação 15.

$$BOC=Qg (1 - r) \quad (14)$$

$$BOL=-[4,903 \cdot 10^{-9} T_{AR}^4 (0,56-0,25\sqrt{e_a}) (0,1+0,9\frac{n}{N})] \quad (MJ \ m^{-2}d^{-1}) \quad (15)$$

Em que:  $T_{AR}$  é temperatura média diária do ar (K),  $e_a$  é pressão parcial de vapor d'água da atmosfera (kPa),  $n$  a insolação (número de horas de brilho solar) e  $N$  o fotoperíodo (intervalo entre o nascer e o pôr do Sol no determinado dia).

#### 4.3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Foram usados métodos empíricos, baseados principalmente na temperatura. O método de Penman-Monteith servirá de referência e posteriormente comparado aos métodos de evapotranspiração potencial de Thornthwaite, Hargreaves & Samani e Blaney-Cridde, esses métodos foram escolhidos por serem adequados para regiões semiáridas e tem como base de cálculos a entrada e saída de água no sistema.

##### 4.3.1 Método de Penman-Monteith (FAO - 1991)

Este é um método micrometeorológico, descrito por MONTEITH (1965), que foi adaptado por ALLEN et al. (1989) para estimativa da evapotranspiração (ETP) de referência na escala diária. Atualmente, este é o método padrão da FAO (ALLEN et al., 1994), sendo ETP ( $mm \ d^{-1}$ ) dada pela Equação 16:

$$ETP = \frac{0,408 s (Rn-G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T+273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (16)$$

Em que:  $Rn$  é a radiação líquida total diária ( $MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$ );  $\gamma = 0,063 \ kPa \ ^\circ C^{-1}$  é a constante psicrométrica;  $T$  é a temperatura média do ar ( $^\circ C$ );  $U_2$  é a velocidade do vento a 2m ( $m \ s^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão de saturação de vapor (kPa);  $e_a$  é a pressão parcial de vapor (kPa); e  $S$  é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em  $kPa \ ^\circ C^{-1}$ , sendo dada pelas Equações 17, 18 e 19.

$$S = \frac{4098 e_s}{(T+237,3)^2} \quad (17)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (18)$$

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad (19)$$

#### 4.3.2 Método de Thornthwaite

O método Thornthwaite é aplicável em todo o mundo, muitas vezes usado com um coeficiente multiplicador para aumentar a sua magnitude relativa. O método estima evapotranspiração com base na equação Equação 20.

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{N}{12}\right) \cdot \left(\frac{m}{30}\right) \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{\text{média}}}{I}\right)^a \quad (20)$$

Em que:  $T_{\text{média}}$  é a temperatura média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $N$  é a média de horas de sol mensais (h/dia),  $m$  é o número de dias de cada mês, e  $a$  é dado pela equação Equação 21.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49 \quad (21)$$

Enfim,  $I$  é um índice de calor calculado com a soma dos 12 valores mensais de acordo com a Equação 22.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{\text{média}}}{5}\right)^{1,514} \quad (22)$$

#### 4.3.3 Método de Hargreaves & Samani

Este método foi desenvolvido por HARGREAVES & SAMANI (1985) para as condições semiáridas da Califórnia, sua ETP pode ser obtida pela Equação 23.

$$ETP=0,0023 Q_0 (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad (23)$$

Em que:  $Q_0$  é a irradiância solar extraterrestre, expressa em mm de evaporação equivalente;  $T_{max}$  a temperatura máxima do ar ( $^{\circ}C$ );  $T_{min}$  a temperatura mínima do ar ( $^{\circ}C$ ); e  $T_{med}$  a temperatura média do ar ( $^{\circ}C$ ), no período considerado.

#### 4.3.4 Método de Blaney-Criddle

BLANEY e CRIDDLE, em 1950 (DOORENBOS e PRUIT, 1975), desenvolveram uma fórmula empírica destinada a estimar as necessidades de água para que uma dada cultura se desenvolva sem limitações hídricas (uso consuntivo), utilizando a temperatura do ar ( $t$ ) e a porcentagem média diária ( $f^*$ ) de horas do fotoperíodo anual, que corresponde ao intervalo de tempo selecionado. A partir desses parâmetros climatológicos os autores determinaram o fator de uso consuntivo ( $H^*$ ), obtida pela Equação 24.

$$H^* = f^* (0,46t + 8,13) \quad (24)$$

O fator  $H^*$  é dado em milímetros de lâmina de água para todo o período, quando  $f^*$  for expresso em porcentagem e a temperatura média diária do ar ( $t$ ) em  $^{\circ}C$ .

A partir do cômputo de  $H^*$ , estima-se  $EP_0$  ( $mm \text{ dia}^{-1}$ ), levando-se em conta as médias diárias (para todo o período) da umidade relativa do ar, da razão de insolação ( $n/N$ ) e da velocidade média do vento ( $u_2$ ) observada a 2m de altura, através da Equação 25.

$$EP_0 = a + bH^* \quad (25)$$

Em que:  $a$  e  $b$  são coeficientes empíricos (Tabela 7). Note-se que, para uma determinada data, a razão de insolação é o quociente entre a insolação ( $n$ ) e o fotoperíodo ( $N$ ).

TABELA 7 - Coeficientes (a, b) para estimativa da evapotranspiração de referência ( $EP_o$ ) a partir da fórmula de blaney-cridle, em função da umidade relativa do ar (U), da razão de insolação (n/N) e da média diária da velocidade do vento ( $U_2$ )

Razão de Isolação	Umidade Relativa do Ar			Velocidade do Vento
	Baixa $U < 20\%$	Média $20\% < U < 50\%$	Alta $U > 50\%$	( $u_2$ )
Baixa	a=-2,00 b=1,15	a=-2,00 b=1,05	a=-1,45 b=0,80	$U_2 > 5 \text{ ms}^{-1}$
$0,3 < n/N < 0,6$	a=-1,80 b=1,26	a=-1,85 b=1,15	a=-1,55 b=0,88	$2 \text{ ms}^{-1} \leq u_2 \leq 5 \text{ ms}^{-1}$
	a=-1,60 b=1,40	a=-1,70 b=1,25	a=-1,65 b=0,98	$2 \text{ ms}^{-1} < u_2$
Média	a=-2,30 b=1,35	a=-2,20 b=1,20	a=-1,80 b=0,90	$U_2 > 5 \text{ ms}^{-1}$
$0,6 < n/N < 0,8$	a=-2,05 b=1,55	a=-2,15 b=1,38	a=-1,75 b=1,06	$2 \text{ ms}^{-1} \leq u_2 \leq 5 \text{ ms}^{-1}$
	a=-1,80 b=1,73	a=-2,10 b=1,52	a=-1,65 b=1,16	$2 \text{ ms}^{-1} < u_2$
Alta	a=-2,60 b=1,55	a=-2,40 b=1,37	a=-2,15 b=1,14	$U_2 > 5 \text{ ms}^{-1}$
$n/N > 0,8$	a=-2,30 b=1,82	a=-2,50 b=1,61	a=-1,95 b=1,22	$2 \text{ ms}^{-1} \leq u_2 \leq 5 \text{ ms}^{-1}$
	a=-2,00 b=2,06	a=-2,53 b=1,37	a=-1,70 b=1,31	$2 \text{ ms}^{-1} < u_2$

FONTE: DOORENBOS e PRUIT (1975)

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA GRAVIDADE DA SECA ATRAVÉS DO ÍNDICE DE RECONHECIMENTO DE SECAS

A severidade de seca foi avaliada calculando o Índice de Reconhecimento de Seca, que é expresso por ( $\alpha$ ) e a fórmula padronizada  $RDI_{st}$ . O valor inicial ( $\alpha_k$ ) do índice é normalmente calculado para o i-ésimo ano em uma base de tempo de

meses consecutivos k, o calculo do Índice de Reconhecimento de seca pode ser visto na Equação 26.

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, \quad i=1(1)N \text{ e } j=1(1)K \quad (26)$$

Em que:  $P_{ij}$  e  $PET_{ij}$  são a precipitação e a evapotranspiração potencial do j-ésimo mês do i-ésimo ano e N é o número total de anos de dados disponíveis.

Para o cálculo do  $RDI_{st}$  (RDI padrão) usa-se a expressão da Equação 27.

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{Y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (27)$$

Em que  $y^{(i)}$  é o  $\ln(\alpha_k^{(i)})$ ,  $\bar{y}$  é a média aritmética  $\hat{\sigma}_y$  e o seu desvio padrão.

Os valores positivos de  $RDI_{st}$  indicam períodos úmidos, enquanto valores negativos indicam períodos de seca em comparação com as condições normais da área. A gravidade dos eventos de seca aumenta quando os valores de  $RDI_{st}$  são mais negativos. Severidade de seca pode ser classificados em leve, moderada, grande e extremas, correspondente às respectivas faixas de valores limites de  $RDI_{st}$  (-0,5 a -1,0), (-1,0 a -1,5), (-1,5 para -2.0) e (< -2.0). O RDI é calculado para um ano hidrológico em períodos de referência pré-determinados (VANGELIS et al, 2013).

#### 4.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DE INDICADORES ESTATÍSTICOS

Os indicadores estatísticos foram usados para comparar o impacto dos diferentes métodos de ETP em valores de RDI, são eles a Raiz do Erro Quadrado Médio (RMSE) e a Média de Erro de Bias (MBE). Onde o RMSE é calculado de acordo com a Equação 28:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{est,i} - X_{obs,i})^2} \quad (28)$$



O valor de RMSE é sempre positivo, representado como "zero" no caso ideal (YAPO et al., 1998).

Por sua vez a MBE é calculado de acordo com a Equação 29:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{est,i} - X_{obs,i}) \quad (29)$$

O qual permite uma comparação do desvio real entre os valores previstos e medidos através de um prazo, o valor ideal de MBE é "zero" (GUNHAN et al., 2005).

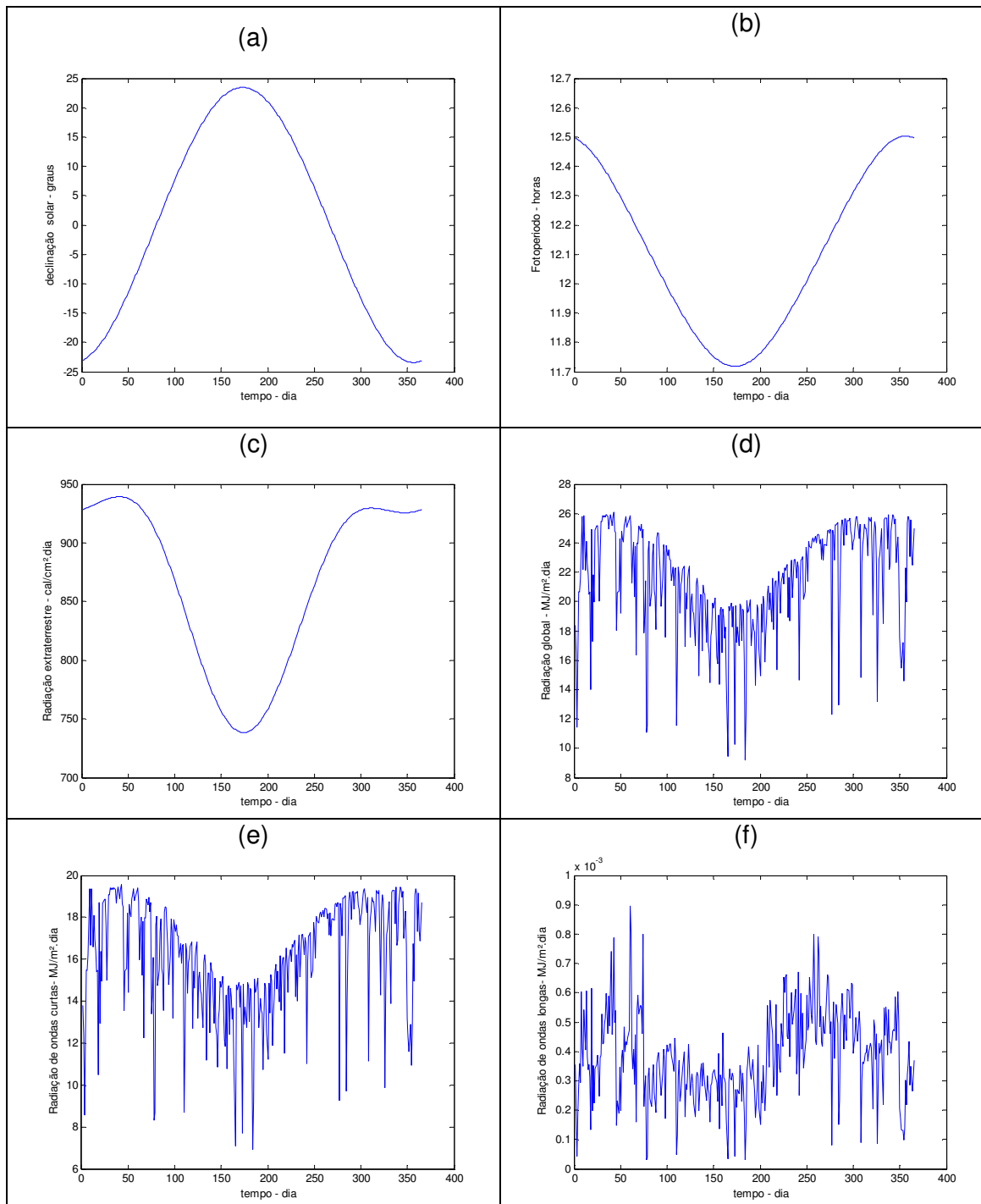
#### 4.6 CÁLCULOS DOS VALORES

Os resultados foram calculados utilizando o software MATLAB, através do desenvolvimento de rotinas, distribuídos em períodos anuais, semestrais, trimestrais e mensais para série de 23 anos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Cálculo da declinação solar foi efetuado utilizando a Equação 3, calculada para valores diários onde pode ser visto no Figura 2(a) e seu resultado foi expresso em graus. Em relação ao fotoperíodo é calculado a partir da primeira hora de sol a seu anoitecer, para esse cálculo foi usada a Equação 8 e seus resultados podem ser observados na Figura 2(b). Radiação extraterrestre por sua vez foi calculada levando em conta os ganhos e perdas de radiação diariamente em  $\text{cal/cm}^2.\text{dia}$  (Equação 12) e seus resultados podem ser visualizados na Figura 2(c). Já a radiação global foi estimada através da Equação 13, a partir de dados de insolação, onde seus resultados podem ser visualizados na Figura 2(d), O balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas foi calculado respectivamente pelas Equações 14 e 15 e exibidas nas Figuras 2 (e) e (f). Todos esses citados acima foram calculados valores diários.

Figura 2 - Parâmetros meteorológicos do local de estudo referente: (a) resultados da declinação solar diária, (b) resultados do fotoperíodo, (c) resultados da radiação extraterrestre, (d) resultados da radiação global, (e) resultados do balanço de radiações de ondas curtas e (f) resultados do balanço de radiações de ondas longas.

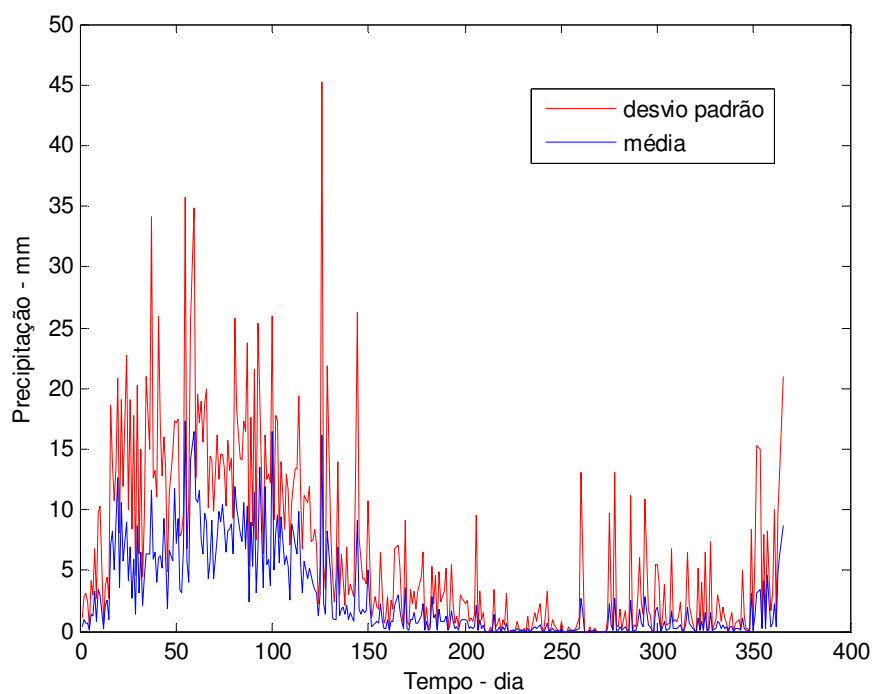


Fonte: Autor (2015)

É interessante observar a grande diferença de valores dos resultados de radiações de ondas longas e de ondas curtas, no entanto são justificáveis esses resultados, como as ondas curtas são emanadas pelo Sol, elas apresentam um valor mais significativo de radiação, após tocarem a superfície terrestre parte é absorvida e parte é refletida, ondas longas, e ficam oscilando entre a superfície e a atmosfera com valores de radiação bem menores.

Pode ser observada na Figura 3 a relação entre a média da precipitação diária dada em mm e o desvio padrão em tempo por dia.

Figura 3 - Relação precipitação e desvio padrão

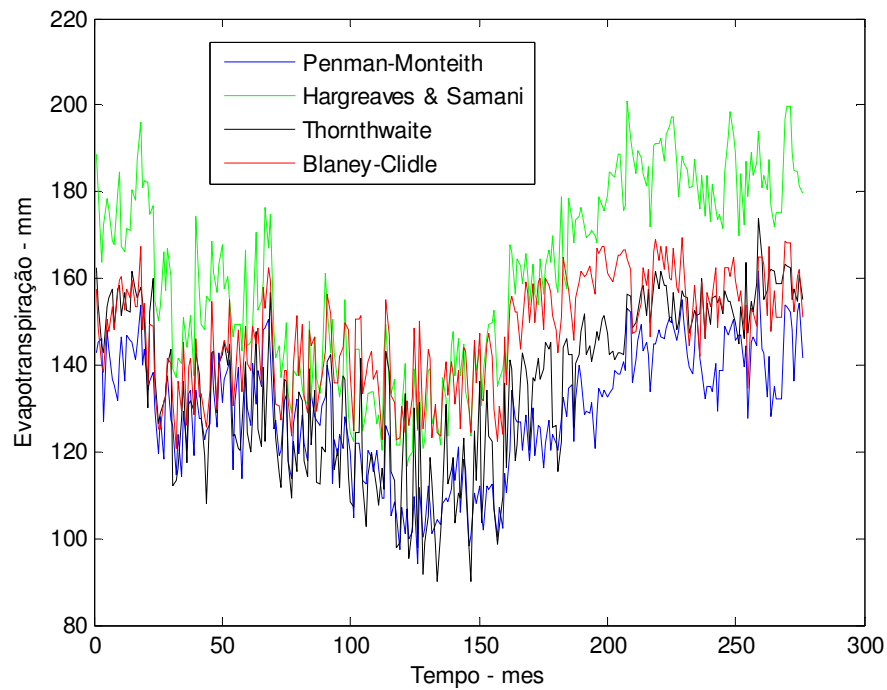


Fonte: Autor (2015)

Pode-se visualizar com esses resultados que a média diária de chuva sempre foi inferior ao desvio padrão confirmando o problema de falta d'água que afeta essa região.

Pode ser visualizada na Figura 4, a comparação dos valores de evapotranspiração média dos métodos Penman-Monteith, Thornthwaite, Hargreaves & Samani e Blaney-Cridle.

Figura 4 - Comparação entre os métodos de evapotranspiração



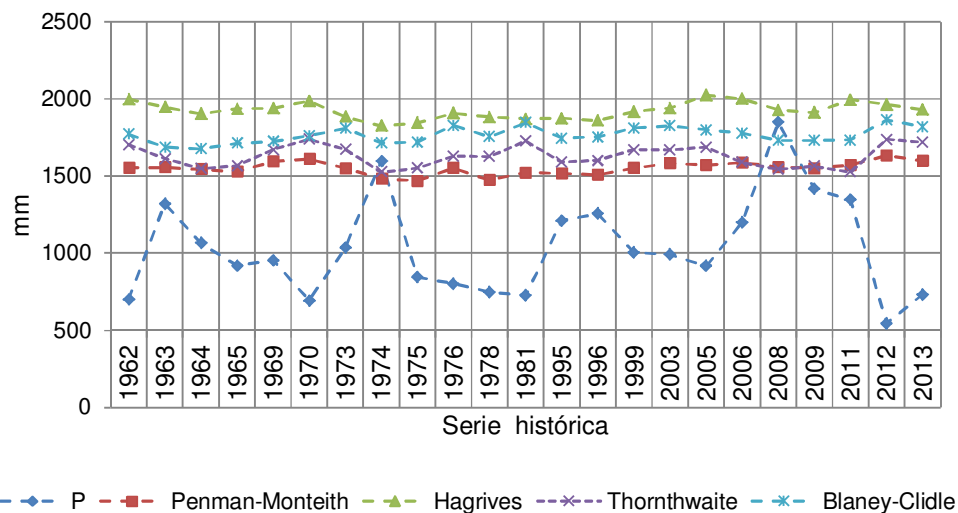
Fonte: Autor (2015)

Esses resultados demonstram que entre os métodos testados Thornthwaite é o que mais se aproxima do método padrão (Penman-Monteith), tornando-se o mais indicado para ser utilizado.

ALENCAR et al (2011) realizou um estudo comparando os métodos de Blaney Criddle, HargreavesSamani e Radiação com o método padrão (Penman-Monteith FAO 56) no município de Uberaba-MG, com dados diários de 10 anos (1996 a 2005), onde o método de Blaney Criddle mostrou-se ser mais preciso enquanto que o método de Hargreaves-Samani apresentou o pior desempenho.

O GRAF. 1 mostra a relação entre a Precipitação em mm e a evapotranspiração anual dos métodos obtidos através da série histórica.

Gráfico 1 - Relação entre precipitação e métodos de evapotranspiração potencial



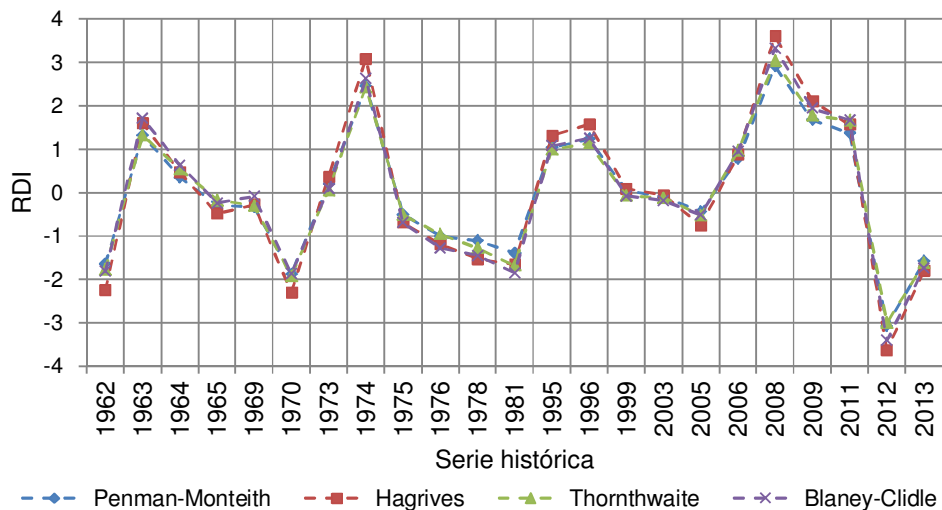
Fonte: Autor (2015)

Percebe-se os valores anuais de chuva bem abaixo, enquanto que a evapotranspiração em média geralmente é o dobro dos valores, podendo chegar em alguns pontos no triplo, como esta represando no ano de 2012 onde choveu 544,3 mm e a evapotranspiração foi de 1800 mm em média.

Quando comparado os métodos, fica mais evidente a aproximação do método de Thornthwaite do padrão, seguido pelo método de Blaney-Cridde e o que mais se distância é o método de Hargreaves.

Comparado à série histórica para diagnosticar os anos afetados por seca, nove dos vinte e três anos foram detectados sua presença. Segundo os valores da Tabela 1 e o Gráfico 2, pode-se observar que os anos 1962, 1970, 1975, 1976, 1978, 1981, 2005, 2012 e 2013, foram diagnosticados com base nos resultados do RDI.

Gráfico 2 - RDI anual



Fonte: Autor (2015).

Onde apresenta-se algumas diferenças em relação à classificação da seca entre os métodos estudados: em 1962 e 1970 os métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite e Blaney-Clidle classificaram a seca como grave, enquanto que o método de Hagrives a classificou como classes extremas. Já em 1975 todos os métodos classificaram a seca como leve. Em 1976 Penman-Monteith e Thornthwaite classificaram como leve, enquanto que Blaney-Clidle e Hagrives a classificaram como moderado. No ano de 1978 só Hagrives classificou como grave, os outros métodos classificaram a seca como moderada. Já em 1981 só o método de Penman-Monteith classificou a seca como moderada, os outros métodos a classificaram como grave. Em 2005, Thornthwaite, Blaney-Clidle e Hagrives classificaram a seca como leve, enquanto que Penman-Monteith não acusou seca naquele ano. Para finalizar 2012 e 2013 acordaram nos resultados dos métodos sendo unânime a seca classificada entre classes extremas e grave. Podendo ser observado na Tabela 8.

TABELA 8 - Classificação de acordo com o índice de seca

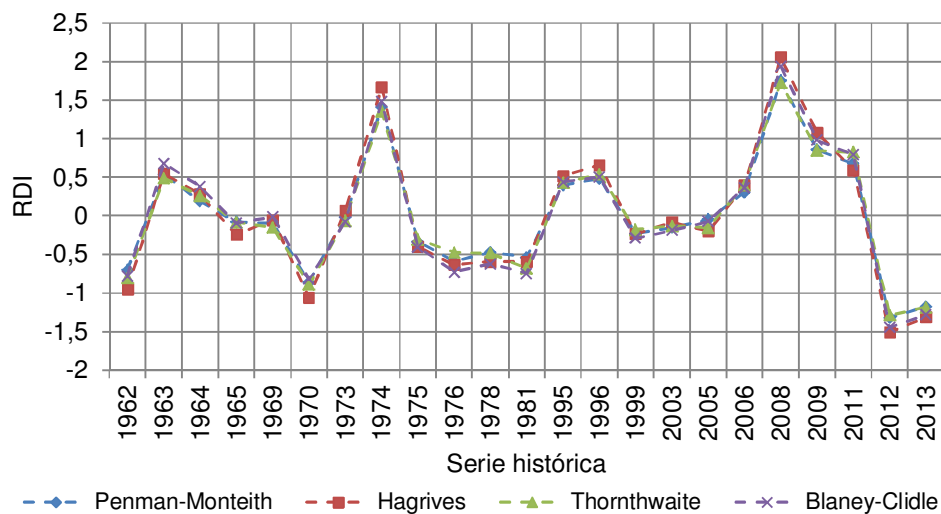
Anos	Penman - Monteith	Thornthwaite	Blaney - Clidle	Hagrives
1962	Grave	Grave	Grave	Classes Extremas
1970	Grave	Grave	Grave	Classes Extremas
1975	Leve	Leve	Leve	Leve
1976	Leve	Leve	Moderado	Moderado
1978	Moderado	Moderado	Moderado	Grave
1981	Moderado	Grave	Grave	Grave
2005	-----	Leve	Leve	Leve
2012	Classes Extremas	Classes Extremas	Classes Extremas	Classes Extremas
2013	Grave	Grave	Grave	Grave

Fonte: Autor 2015

Os valores tracejados não foram classificados como ano de seca pelo método.

Observa-se no Gráfico 3 os cálculos remodelados do índice de Reconhecimento de Secas para o primeiro semestre (janeiro a junho) de cada ano.

Gráfico 3 - RDI semestral de janeiro a junho



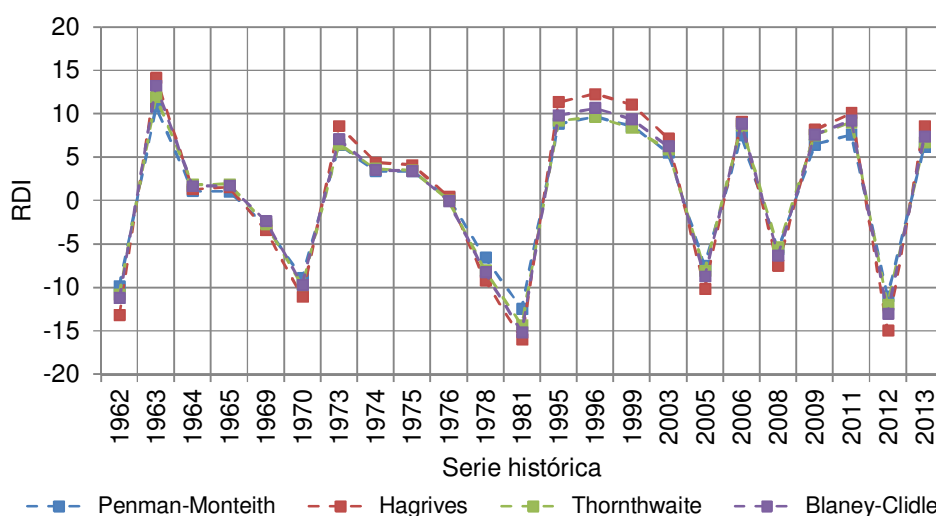
Fonte: Autor (2015).



No primeiro semestre dos anos 1962, 1970 e 1981 os quatro métodos determinaram seca leve. Em 1976 Thornthwaite não classificou seca, enquanto que os outros métodos a classificaram como leve. Já em 1978 Blaney-Clidle e Hagrives foram os únicos métodos a classificarem a seca como leve. Mostrando apenas cinco anos sendo classificados como seco embora seja a menos agressivo.

O Gráfico 4 por sua vez exhibe o resultado do índice de Reconhecimento de Secas para o segundo semestre (julho a dezembro) de cada ano.

Gráfico 4 - RDI semestral de julho a dezembro

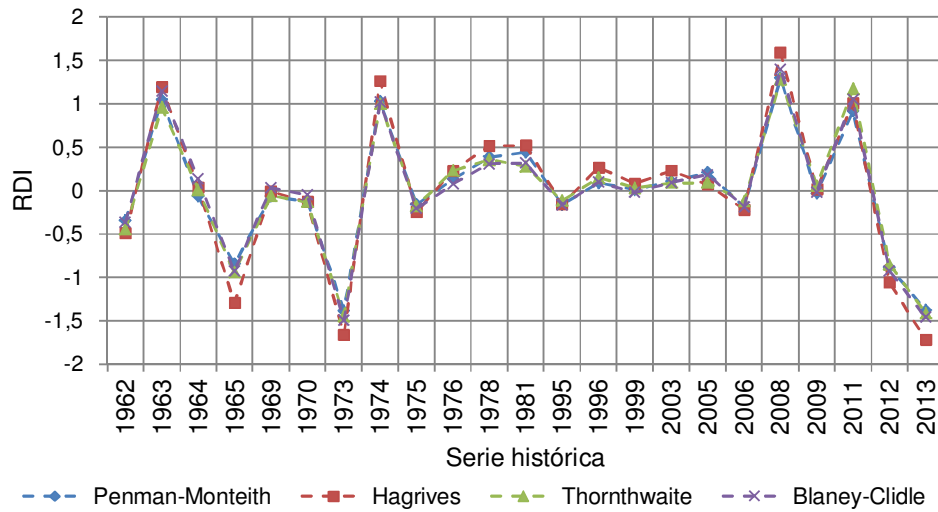


Fonte: Autor (2015).

Já no segundo semestre os anos de 1962, 1969, 1970, 1978, 1981, 2005, 2008 e 2012 foram todos classificados como seca de classes extremas pelos métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Clidle e Hagrives. Indicando assim que a seca no segundo semestre do ano para a região do semiárido é mais severa do que no primeiro semestre.

Separando o Índice de Reconhecimento de Secas em trimestre temos os meses de janeiro a março onde pode ser analisado observando o Gráfico 5.

Gráfico 5 - RDI trimestral de janeiro a março

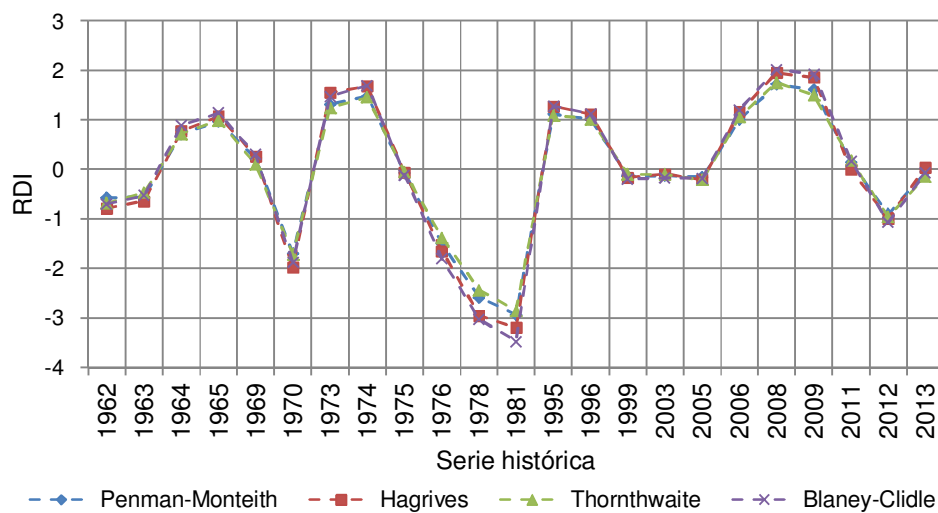


Fonte: Autor (2015).

Para os meses de janeiro a março o método de Hagrives classificou a seca como moderada para os anos de 1965 e 2012, enquanto que os demais métodos classificaram como leve. Em 1973 e 2013 o método de Hagrives classifica a seca como grave, enquanto que os outros métodos classificam-na como moderada.

O Gráfico 6 traz os valores referentes ao segundo trimestre, que vai de abril a junho.

Gráfico 6 - RDI trimestral de abril a junho

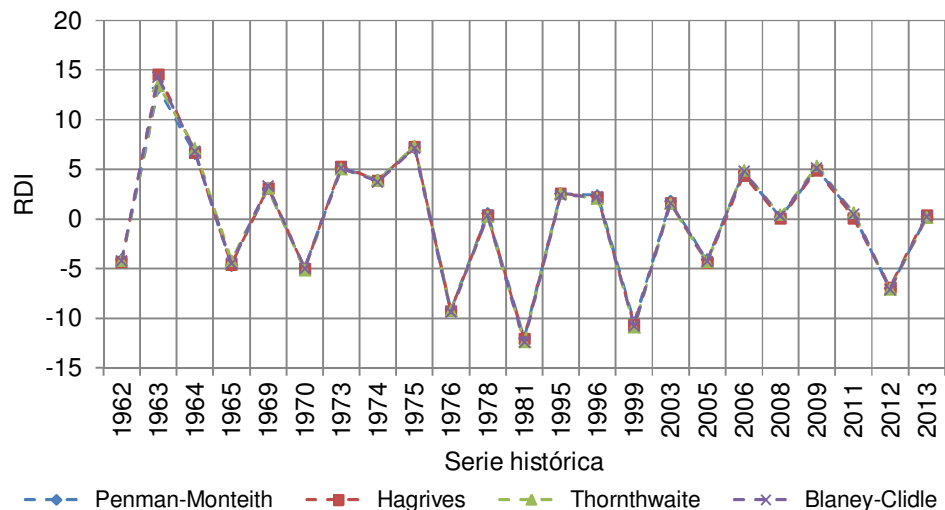


Fonte: Autor (2015).

O ano de 1962 todos os métodos declararam seca leve. Já em 1963 o método de Thornthwaite não classificou como ano de seca, enquanto os outros três métodos a classificaram como leve. Em 1970 todos os métodos classificaram a seca como grave. Enquanto que em 1976 Hagrives e Blaney-Clidle continuou a classificação como grave, já Penman-Monteith e Thornthwaite classificou como moderada. Para os anos de 1978 e 1981 os métodos foram unânimes em classificar a seca como classes extremas.

O Gráfico 7 exibe valores referentes ao terceiro trimestre do ano, onde abrange os meses de julho a setembro.

Gráfico 7 - RDI trimestral de julho a setembro

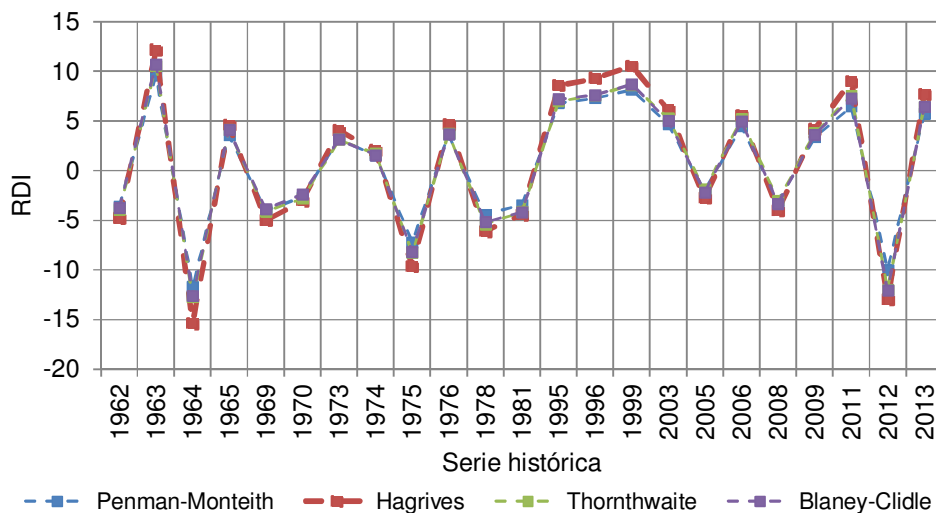


Fonte: Autor (2015).

Está bem definido o período de escassez, onde os anos de 1962, 1965, 1970, 1976, 1981, 1999, 2005 e 2012 foram classificados pelos quatro métodos como seca de classes extremas. Ficando cada vez mais explícito que o segundo semestre é responsável pela seca mais severa.

O Gráfico 8 aborda o Índice de Reconhecimento de Seca para o último trimestre correspondente aos meses de outubro a dezembro de cada ano.

Gráfico 8 - RDI trimestral de outubro a dezembro

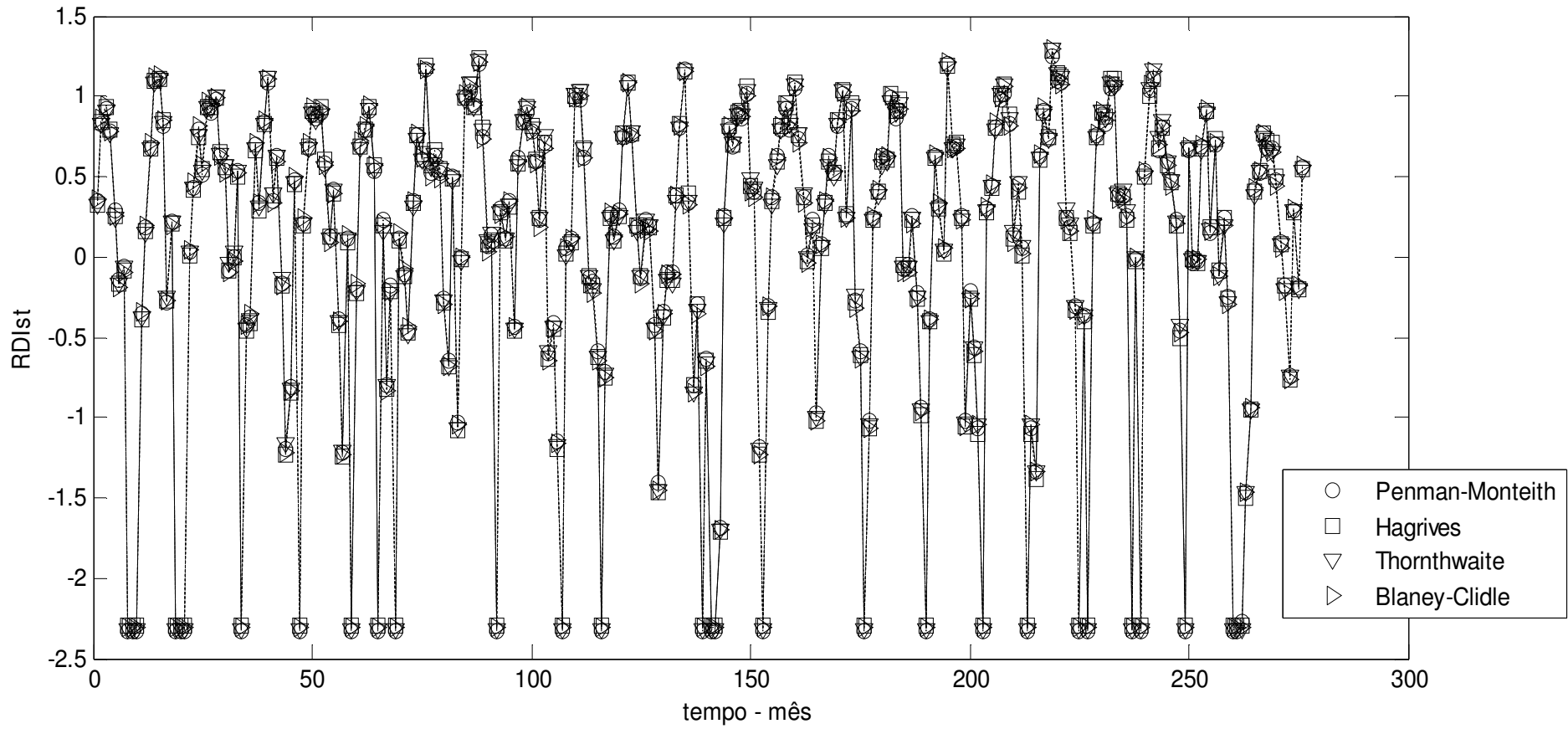


Fonte: Autor (2015).

Os anos de 1962, 1964, 1969, 1970, 1975, 1978, 1981, 2008 e 2012 foram classificados como seca de classes extremas por todos os métodos. Já o ano de 2005 continuou sendo classificado como classes extremas pelos métodos de Hagrives e Blaney-Clidle, e como grave pelos métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite.

Pode ser visto no Gráfico 9 os valores de RDI mensais para todos os métodos.

Gráfico 9 - RDI mensal



Fonte: Autor (2015)

Quando comparados de forma mensais não fica claro qual seria o melhor método, em virtude da demanda de valores, mais é um gráfico interessante de ser mostrado.

ARAÚJO et al. 2007 estimou a evapotranspiração de referência mensal para a cidade de Boa Vista pelos métodos de Thornthwaite, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Penman-Monteith FAO (usado como referencia), Tanque Classe "A" e Makkink. Onde O método de Blaney-Criddle estimou valores de evapotranspiração bastante similar ao padrão.

Moura et al. 2013, por sua vez, realizou um estudo para avaliar as estimativas da evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira - PE, utilizando métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Thornthwaite modificado e Thornthwaite tomando-se como padrão o método de Penman-Monteith. Onde Hargreaves-Samani foi o que mais se aproximou do padrão.

Os resultados referentes à avaliação de desempenho através de indicadores estatísticos podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Avaliação de desempenho através de indicadores estatísticos

<b>Tempo</b>	<b>Métodos de Evapotranspiração</b>	<b>RMSE</b>	<b>MBE</b>
Anual	Thornthwaite	42,52541	77,76932
	Hargreaves	115,6083	373,8027
	Blaney-Criddle	70,05148	213,9234
Semestral Jan - Jun	Thornthwaite	19,11937	8,466083
	Hargreaves	43,79453	69,21586
	Blaney-Criddle	44,05266	44,4958
Semestral Jul - Dez	Thornthwaite	23,20895	30,41858
	Hargreaves	69,02665	117,6855
	Blaney-Criddle	39,37809	62,06812
Trimestral Jan - Mar	Thornthwaite	9,979106	3,1705
	Hargreaves	25,67633	20,94466
	Blaney-Criddle	9,445456	6,937043
Trimestral Abr - Jun	Thornthwaite	9,120995	1,062541
	Hargreaves	17,31203	13,66326
	Blaney-Criddle	19,03336	15,31086
Trimestral Jul - Set	Thornthwaite	10,85205	6,301072
	Hargreaves	32,84732	27,8904
	Blaney-Criddle	24,65866	20,95828
Trimestral Out - Dez	Thornthwaite	12,311	8,908216
	Hargreaves	36,10253	30,95235
	Blaney-Criddle	12,9332	10,27466
Mensal	Thornthwaite	12,27603	5,593149
	Hargreaves	33,37324	31,15022
	Blaney-Criddle	20,22212	17,82695

Fonte: Autor (2015)

Levando em consideração os menores valores referentes à RMSE e MBE o método que apresentou os melhores resultados (mais próximo à zero) foi Thornthwaite, sendo ele o mais indicado para ser usado na região semiárida.

Esses indicadores estatísticos apresentam facilidade na hora de sua aplicação, pois são calculados de forma simples e de fácil identificação de resultados.

## 6 CONCLUSÕES

- Os dados Meteorológicos Foram obtidos através da Estação Meteorológica do INMET.
- Os valores consistentes da evapotranspiração foram estimados através dos métodos de Penman-Monteith, Thornthwaite, Blaney-Criddle e Hargreaves, os mesmos variaram na faixa própria de regiões semiáridas.
- Os resultados dos Índices de Reconhecimento de Seca Padrão foram estimados para períodos mensais, trimestrais, semestrais e anuais, onde indicaram os períodos mais secos observados na série de chuvas indicando 2012 como o ano mais seco.
- O método Thornthwaite foi o que mais se aproximou do método de referência, sendo o mais indicado para ser usado na região, onde o mesmo é de fácil estimação necessitando somente de dados meteorológicos (temperatura).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, L. P.; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. **Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba.** v.6, n.2, p.337-343, abr.-jun., 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.** Rome-Italy, 1998.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; Burman, R.D. **Operational estimates of reference evapotranspiration.** Agronomy Journal 81:650-662, 1989.
- ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. **An update for the calculation of reference evapotranspiration.** ICID Bulletin 43(2), 1994.
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (eto) para. **Revista Caatinga.** Mossoró: v.20, n.4, p.84-88, julho 2007.
- ASA. **Articulação Semiárido Brasileiro.** Disponível em [http://www.asabrasil.org.br/Portal/Informacoes.asp?COD\\_MENU=97](http://www.asabrasil.org.br/Portal/Informacoes.asp?COD_MENU=97). Acesso em 6 de agosto de 2014.
- AZEVEDO, P. V.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; VARGAS, G. A. O., **Zoneamento do Potencial de Energia Solar no Nordeste.** UFPB, Campina Grande, 1981.
- BARROS, K; O. **Índice de Aridez Como Indicador da Susceptibilidade à Desertificação na Mesorregião Norte de Minas.** 2010. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Universidade Federal de Viçosa –UFV, Minas Gerais, 2010.
- CARDOSO, M; C.; JUSTINO, F. Simulação Dos Componentes da Evapotranspiração sob Condições Climáticas Atuais e de Cenários Climáticos Futuros de Aquecimento Global Com o Uso de Modelos de Clima-Vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.29, n.1, 85 - 95, 2014.
- CARVALHO, L. G. et al. **Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa.** Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, 2011, vol.41, nº.3, July/Sept. 2011.

CUNHA, R. L. A. **Definição de Cenários de Referência para Avaliação dos Impactos das Secas**. 2008. 147. Relatório de Projeto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil — Especialização em Hidráulica – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto – FEUP, Portugal, 2008.

DOORENBOS, J.; PRUIT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. ONU-FAO, Roma, 1975 (Irrigation and Drainage Paper, 24).

FERNANDES, D. S. et al. **Índices para a Quantificação da Seca**. 1ª. ed. Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 48 p.

GUNHAN, T. et all. **Mathematical modelling of drying of bay leaves**. Energy Conversion and Management. 2005. 46 p.

Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago, Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting (Paper 85-2517), 1985.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo 2010. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000008473104122012315727483985.pdf>. Acesso em 9 de julho de 2014.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on Titled Surfaces. **Solar Energy**, 19: 325-329, 1977.

LIST, R. J. **Smithsonian Meteorological Tables**. Smithsonian Institution, Washington, 1971.

MONTEITH, J.L. **Principles of environment physics**. Elsevier, New York, 241p., 1973.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO S. M<sup>a</sup>. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M<sup>a</sup>. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.28, n.2, 181 - 191, 2013

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ed. Ceres, 1981. 440p.

**Organização Meteorológica Mundial**, Geneve, 1971.

PALMER, W. C. **Meteorological drought**. Washington: U. S. Department of Commerce, 1965. 65 p. (Research paper, 45).

PEREIRA, A. R; ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo. Edição Revista e Ampliada, 2007. 192 p.

SALAS, J.D.; FU, C.; CANCELLIERE, A.; DUSTIN, D.; BODE, D.; PINEDA, A.; VINCENT, E. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado, **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.131, p.383–393, 2005.

SANTOS, E. et al. A Seca no Nordeste no ano de 2012: Relato Sobre a Estiagem na Região e o Exemplo de Prática de Convivência com o Semiárido no Distrito de Iguaçu/Canindé-CE. **Revista Geonorte**, 2012, v. 2, n. 5, p. 819-830, Edição Especial 2, V.1, N.5, p. 819 – 830, 2012.

SERRA, A. **Médias Mensais em Meteorologia**. CNPq/Departamento Nacional de Meteorologia, Rio de Janeiro, 1974.

SHUTTLEWORTH, J.W. Evaporation models in Hydrology. p93-120. In: T,J. 1991. THORNTWHAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geogr. Review 38:55-94, 1948.

TSAKIRIS, G.; PANGALOU, D.; VANGELIS, H. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). **Water Resour Manage**, Grecia, 2007, 21, 821 e 833, dez.

VANGELIS, H.; TIGKAS, D.; TSAKIRIS, G. The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation, **Journal of Arid Environments**, Grecia, 2013, 130 e 140, out.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. **Comparação de Três Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência Para a Região de Araraquara – SP**. Jaboticabal, v. 25, nº. 3, p. 713-721, set./dez. 2005.

WEGHORST, K. M. **The reclamation drought index**: guidelines and practical applications. Denver: Bureau of Reclamation, 1996. 6 p.

WON, T. K. *The Simulation of Hourly Global Radiation from Hourly Reported Meteorological Parameters - Canadian Prairie Area*. University of Alberta, Edmonton (Solar Energy Update), 1977

Yapo, P.O., Gupta, H.V., Sorooshian, S. **Multi e objective global optimisation for hydrologic models**. Journal of Hydrology. 1998. 204 p.

ZARCH, M. A. A. et al. Drought Monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran. **Water Resour Manage**, Shiraz, 3485 e 3504, jun. 2011.