



UNIVERSIDADE ESTADUAL SUDOESTE DA BAHIA – UESB
DEPARTAMENTO DE
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA TRÊS LOCALIDADES DO
ESTADO DA BAHIA**

JOÃO PAULO SILVA

VITORIA DA CONQUISTA – BA
2009

JOÃO PAULO SILVA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA
PARA TRÊS LOCALIDADES DO ESTADO DA BAHIA**

Monografia entregue pelo aluno João Paulo Silva, como parte das exigências para a conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Florestal – UESB.

Orientador: Prof. Dsc. Cristiano Tagliaferre

**VITÓRIA DA CONQUISTA - BA
2009**

DEDICATÓRIA

A minha Família

Aos Poucos amigos

A natureza

“Se é pensado, é possível...”.

OFEREÇO

A todos a quem este trabalho possa servir.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Joel José da Silva, verdadeiro ser maior e supremo, onipresente, onisciente e onipotente de minha vida.

A minha mãe Idalina, verdadeira santa, de colo acolhedor e seio confortante onde encontro minha paz e segurança.

As minhas Três contas d'água Mema, Lane e Jubi e seus respectivos maridos pelo amor e carinho a mim dispensados.

Aos meus sobrinhos, seqüência de DNA da família, pelos momentos de descontração.

Aos amigos e colegas de curso pela força e apoio dedicados.

Ao professor Dr. Cristiano Tagliaferre pela disponibilidade, oportunidade, compreensão e ajuda que me foi concedida neste.

Aos professores do curso de Engenharia Florestal como um todo.

Aos funcionários agregados ao curso.

A todos o meu mais sincero OBRIGADO!

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	6
ABSTRAT.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1 Caracterização dos municípios.....	12
3 OBJETIVOS.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração de referência.....	17
4.1.1 Método de Penman-Monteith – FAO 56 (método-padrão)	18
4.1.2 Método de Penman modificado (DOORENBOS e PRUITT, 1977).	19
4.1.3 Método de Blaney-Criddle (PEREIRA et al., 1997).....	20
4.1.4 Método de Priestley-Taylor (PT).....	21
4.1.5 Método de Turc (61).....	21
4.1.6 Método Radiação FAO 24 (Rd FAO 24).....	22
4.1.7 Método de Hargreaves-Samani (PEREIRA et al., 1997).....	22
4.2 Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
6. CONCLUSÕES.....	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

RESUMO: Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho de algumas equações empíricas usadas para estimar a evapotranspiração de referência em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO – 56 para as condições climáticas dos municípios de Anagé, Piatã e Ilhéus, localizadas na região sudoeste do estado da Bahia. Foram utilizadas variáveis climáticas referentes aos anos de 2006 e 2007 obtidas através da plataforma automática de coleta de dados da Superintendência de Recursos Hídricos da Bahia/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, no qual se obteve a média para os dois anos. Para comparar os valores de ETo estimados por meio das equações empíricas com os do método padrão Penman-Monteith (FAO56) foram considerados os parâmetros da equação de regressão (a e b), o coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação (r), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c), na escala diária. Para as condições climáticas das três localidades, em função dos índices e parâmetros estudados, os melhores métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência pela ordem foram: Blaney-Criddle, Penman Modificado - FAO 24, Radiação FAO 24, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani.

PALAVRAS-CHAVE: Evapotranspiração de referência, Métodos Empíricos, Variáveis Climáticas.

ABSTRAT: In this work, it was aimed to evaluate the performance of some empirical equations used to estimate evapotranspiration of reference in relation to the standard method Penman-Monteith FAO - 56 for the climatic conditions of the municipality of Anagé, Piatã and Ilheus localized in southwest region of Bahia state. Climatic variables were used referring to the years of 2006 and 2007 obtained through the platform automatic collection of data from the Superintendence de Water of Bahia / National Institute for Space Research, which returned the average for the two years. To compare the values of ETo estimated by the empirical equations with the standard method Penman-Monteith (FAO56) were considered the parameters of the regression equation (a and b), the coefficient of determination (r^2), correlation coefficient (r), estimate the standard error (EEP), index of agreement (d), index of confidence or performance (c), in the

daily scale. For climatic conditions of the three settlement, according to the indices and parameters studied, the best methods to estimate evapotranspiration of the order of reference were: Blaney-Criddle, Penman Modificado - FAO 24, Radiação FAO 24, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani.

KEYWORDS: Evapotranspiration of reference, methods empirical, Climate Variables.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a agricultura irrigada é a maior consumidora de água, dentre as diversas atividades humanas. O manejo racional da irrigação consiste em determinar o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um equipamento de irrigação, ou a sua velocidade de deslocamento, com a finalidade de se aplicar a quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento da cultura.

A determinação do consumo de água de uma cultura é fundamental no manejo da água de irrigação, podendo ser obtida a partir de medidas efetuadas no solo, na planta e nos elementos climáticos. A determinação da evapotranspiração tem sido mais usada por causa da sua maior praticidade e da menor exigência de mão-de-obra no manejo da irrigação. No manejo da irrigação, conduzido através de estimativa de evapotranspiração, os equipamentos mais usados são o tanque Classe A e a estação meteorológica automática.

Com o advento da tecnologia empregada nas estações meteorológicas automáticas que permitem medir e registrar os elementos meteorológicos em frações de tempo cada vez menores, o emprego das equações empíricas de estimativa da evapotranspiração de referência ganhou importância, devido à facilidade com que os dados são manipulados e por estarem disponíveis em meios eletrônicos de fácil acesso. No entanto, JENSEN et al. (1990) citam que o uso de um modelo para estimativa da evapotranspiração em uma determinada região pressupõe sua validade para cada localidade, sendo de fundamental importância fazer uma comparação e uma calibração dos diferentes modelos para cada localidade onde se deseja utilizá-los, levando em consideração as condições locais. As maiorias das equações desenvolvidas não são universalmente aplicadas, sem as modificações ou calibrações locais, para cada situação de cultura ou condição climática.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Entre todas as atividades econômicas, a que mais depende das condições climáticas é a agricultura. A grande variabilidade temporal e espacial da distribuição das chuvas, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, determina altos níveis de risco às atividades agrícolas.

A estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ET_c) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, uma vez que totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período. A ET_c é obtida através do valor da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET_o) corrigida pelo coeficiente da cultura (K_c), sendo este dependente do tipo de cultura e seu estágio de desenvolvimento (ALLEN et al, 1998).

BERNARDO (2006) relata que a determinação da quantidade de água necessária para as culturas pode ser realizada fazendo-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem, na evapotranspiração e na precipitação pluvial, seus principais componentes.

Informações quantitativas e qualitativas da evaporação e transpiração são indispensáveis nos vários campos científicos que tratam do manejo da água na irrigação. Dados de evapotranspiração são necessários para o planejamento, construção e operação de reservatórios, sistemas de irrigação e de drenagem. Assim, o conhecimento dos elementos climáticos que influenciam o processo da evapotranspiração é indispensável.

Diversos pesquisadores em todo o mundo propuseram modelos indiretos para a estimativa da ET_o, com as mais diferentes concepções e número de variáveis climáticas envolvidas. Antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da ET_o, é necessário saber quais os elementos climáticos disponíveis; a partir daí, verifica-se quais podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para certo local de interesse fica na dependência dessas variáveis (MENDONÇA et al, 2003).

A não verificação da adequação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência às condições climáticas, a falta de precisão na estimativa, bem como o erro, devido ao uso de instrumentos de medidas inadequados, em geral, também conduz ao manejo inadequado da água,

afetando muitas vezes a produção agrícola. Aplicações insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo.

A evapotranspiração de referência pode ser determinada de diferentes maneiras. De acordo com BURMAN et al. (1983), ela pode ser obtida a partir de medidas diretas ou estimada a partir de elementos climáticos, utilizando-se de modelos ou métodos teóricos empíricos. No primeiro grupo estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, enquanto no segundo estão enquadrados, conforme JENSEN et al. (1990), os métodos de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Priestley-Taylor e Hargreaves, entre outros, e também os evaporímetros como o tanque Classe A e o atmômetro modificado.

PEREIRA et al. (1997) comentaram que, de acordo com os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, os métodos de estimativa da evapotranspiração se agrupam em cinco categorias: métodos empíricos, métodos aerodinâmicos, método que utiliza o balanço de energia, métodos combinados e o método da correlação dos turbilhões. De acordo com esses autores, alguns métodos empíricos utilizados para determinação da evapotranspiração de referência têm aceitação quase unânime; no entanto, outros são bastante criticados e até desprezados. Os critérios utilizados para rejeição nem sempre são bem esclarecidos, pois inúmeros métodos empíricos têm aceitação quase universal.

PENMAN (1963) citado por HENRIQUE & DANTAS (2007), informa que as limitações dos métodos empíricos são reconhecidas tanto por seus críticos como pelos seus autores, mas, enquanto prosseguem as buscas por melhores soluções, eles podem fornecer valores de consumo de água para uso em balanço hídrico e, nas melhores condições, darem valores que são, pelo menos, tão precisos quanto os que podem ser obtidos por medidas diretas no campo, e fazem isso de um modo mais fácil. HENRIQUE & DANTAS (2007) ainda complementa que fórmulas empíricas mais simples são as mais usadas, não por sua universalidade ou precisão, mas devido à não existência de medidas de superfície que permitem o uso de métodos mais consistentes, tal como o método de Penman-Monteith – FAO 56.

PERES et al. (1995), testando o método Penman-Monteith - FAO 56 em três localidades do Estado de São Paulo, concluíram que ele estimou a

evapotranspiração de referência de forma consistente e bem correlacionada com os valores medidos nos lisímetros, tanto na escala decendial quanto na mensal. MENDONÇA et al. (2003) compararam os valores de ET_0 obtidos em lisímetros de pesagem com grama com os valores resultantes da utilização dos métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Radiação Solar, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e Atmômetro SEEI modificado. Segundo os autores, os métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e o Tanque Classe A superestimaram os dados medidos em lisímetros em todos os meses do ano, enquanto que os métodos de Makkink e Atmômetro subestimaram a ET_0 determinada em lisímetro em 4,2% e 38,3%, respectivamente. Em valores médios ocorridos no período do estudo, o método de Makkink foi o que mais se aproximou do valor medido no lisímetro, seguido pelo método de Penman-Monteith – FAO 56. No mesmo trabalho, os autores observaram aumento progressivo dos coeficientes de determinação com o incremento do período de observação (decendial) e, dos métodos avaliados, o tanque Classe A e o atmômetro apresentaram os menores valores.

CAMARGO & SENTELHA (1997) avaliaram o desempenho de vinte métodos de estimativas da ET_0 , com dados de três localidades de São Paulo, levando em consideração as medições lisimétricas para o período de 1954 à 1960. As avaliações dos dados foram baseadas no coeficiente de correlação (r), de concordância de Willmott (d) e de um índice proposto, denominado de confiança ou desempenho (c), que é o produto ($r \times d$). Os resultados obtidos mostraram desempenho muito bom (0,78 a 0,81) para os métodos de Thorntwaite, CAMARGO e Priestly-Taylor.

MANDELLI et al. (2005) comparando valores de evapotranspiração de referência estimados com uso das equações empíricas de Hargreaves-samani, Thorntwaite, Thorntwaite modificado, Camargo, Camargo modificado e Radiação, com a do método padrão Penman-Monteith – FAO 56 concluíram que os métodos de estimativa de ET_0 que empregam a radiação solar incidente apresentaram desempenho superiores aos que utilizam somente valores da temperatura do ar e que dentre os métodos que utilizam somente a temperatura do ar o de Hargreaves-Samani foi o que apresentou melhor desempenho para Bento Gonçalves-RS.

Diante dos métodos existentes para estimativa da evapotranspiração de referência, a escolha de um deles dependerá da disponibilidade dos dados climatológicos, da confiabilidade desses dados, do nível de precisão exigido, da finalidade (manejo da irrigação, pesquisa etc.) e do poder aquisitivo para a compra e montagem do equipamento. Deve-se ressaltar que quanto mais preciso for o conhecimento do real valor da evapotranspiração da localidade ou região, melhor será o manejo da água de irrigação e conseqüentemente, menor será o impacto da agricultura irrigada sobre os recursos hídricos da região, garantindo assim, sustentabilidade econômica e ambiental para atividade.

2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS

A agricultura irrigada do estado da Bahia vem experimentando, há alguns anos, uma grande expansão. Esse aumento na área irrigada demanda grandes quantidades de água de irrigação para suprir adequadamente as culturas nos períodos de déficits hídricos. Portanto exige-se nessas áreas a implantação de sistemas de irrigação bem dimensionados, além da utilização de métodos adequados que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas para que não ocorra desperdício na utilização da água e energia.

As três localidades escolhidas neste estudo são expoentes da agricultura no estado, sendo caracterizadas por grandes produções agrícolas, movimentando assim a economia interna e externa das mesmas.

O Município de Ilhéus é um dos principais produtores de cacau da Bahia. Com uma área de aproximadamente 600 mil hectares plantados é do ponto de vista dos recursos naturais, um município que representa uma das áreas mais privilegiadas do Estado. Caracteriza-se como uma sub-região tropical úmida, onde a ação climática representa um elemento fundamental na definição do quadro natural, configurando a excelência das formas de relevo e tipos de solo, da diversidade vegetal e a rede hidrográfica. Estes atributos indicam potencialidades variadas que se refletem nos padrões de uso da terra e, conseqüentemente, na economia municipal. Além do Cacau, a cidade também vem investindo nas lavouras de piaçava e dendê, onde as quais têm ganhado bastante espaço dentre os produtores. O clima do município caracteriza-se pelos tipos úmidos e subúmidos. As temperaturas médias anuais variam entre 22° a 25°C, sendo maiores e com menor amplitude térmica na faixa costeira. A

pluviosidade apresenta um gradiente decrescente do litoral para o interior e do Norte para o Sul, com totais anuais superiores a 1.000 mm, chegando a alcançar 2.700 mm. O regime pluviométrico é regular, com chuvas abundantes, e distribuídas durante o ano.

O município de Anagé está localizado no semi-árido baiano apresentando longos períodos de seca e chuvas ocasionais, concentradas em poucos meses do ano. A precipitação pluviométrica é em média cerca de 750 mm/ano, de forma bastante irregular no espaço e no tempo. As altas temperaturas com pequena variação interanual, exercem forte efeito sobre a evapotranspiração que, por sua vez, determinam o déficit hídrico como o maior entrave à ocupação do semi-árido, tornando-se a irrigação uma técnica improtante. Por esse motivo, o uso da irrigação abrange boa parte dos produtores locais, visto que o município possui uma grande barragem que favorece o uso desta técnica, além do predomínio da agricultura familiar. Dentre as principais culturas agrícolas do município, destacam-se o Coco, o Mamão, a Manga e o maracujá. Segundo o censo agropecuário do IBGE em 2006, o município conta com uma área de 1.080 hectares de lavouras permanentes e mais 6.794 hectares de lavouras temporárias.

O município de Piatã é o mais frio e fica em uma das regiões mais altas do estado da Bahia. Por possuir um clima subúmido a seco apresenta chuvas no inverno e um verão menos chuvoso, com uma precipitação anual média de 800 a 900 mm. No inverno a temperatura pode chegar até 7°C ou menos.

O município se destaca economicamente, principalmente, pela cultura do café, que é uma das grandes responsáveis pelo desenvolvimento da localidade, e por outras culturas como o trigo, a banana e a laranja. Segundo o censo agropecuário do IBGE em 2006, o município possui uma área de aproximadamente 13.660 hectares cultivados com lavouras permanentes e temporárias.

Na Figura 1 encontra-se a localização dos municípios de Ilhéus, Anagé e Piatã no mapa do estado da Bahia.

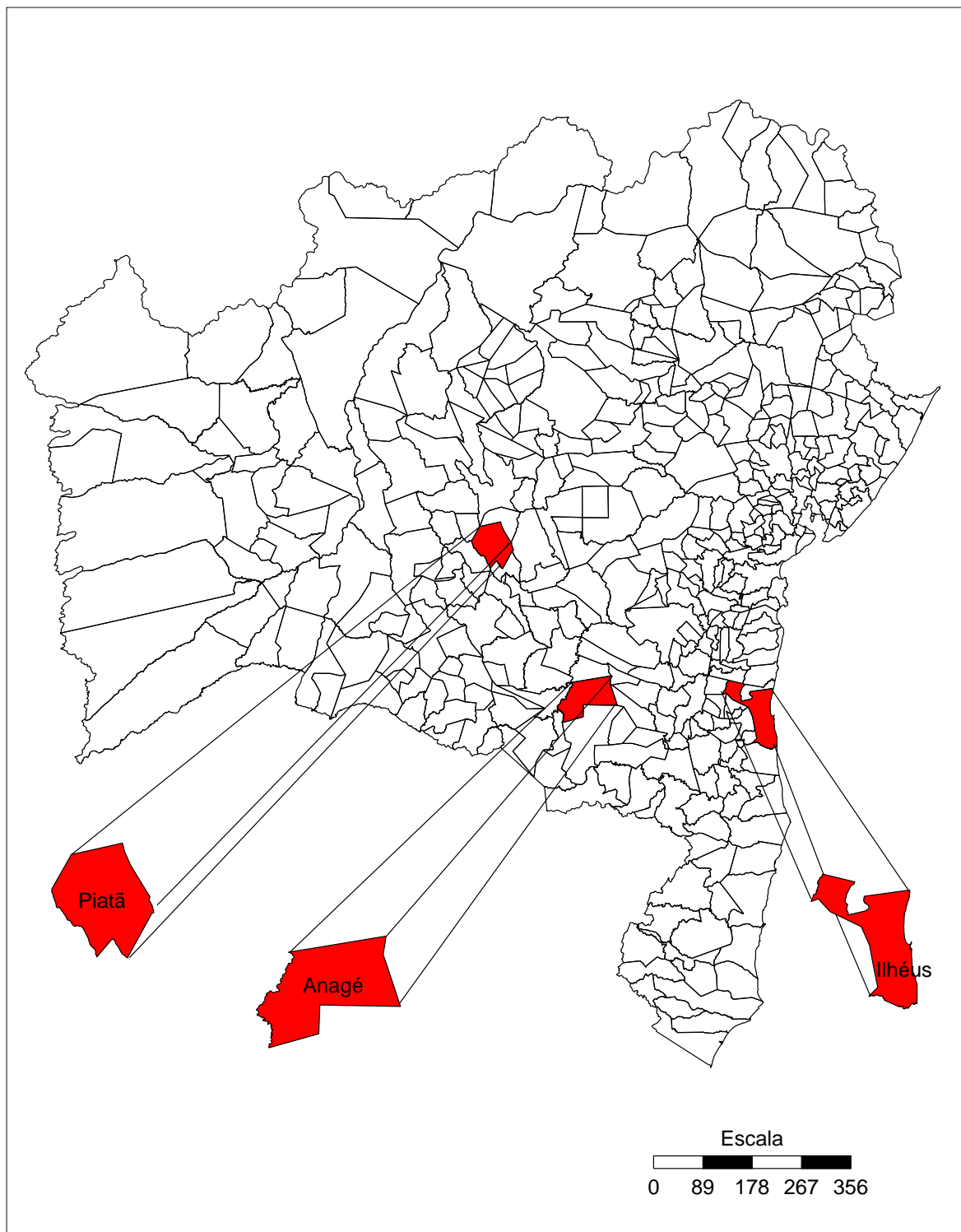


Figura 1 - Localização dos municípios de Ilhéus, Anagé e Piatã no mapa do estado da Bahia.

3. OBJETIVOS

GERAL

- Estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) e avaliar o desempenho das equações que estimam a ET_0 para os municípios de Ilhéus, Anagé e Piatã localizados no estado da Bahia.

ESPECÍFICOS

- Comparar o desempenho das equações que estimam a evapotranspiração de referência, em relação ao método de Penman-Monteith – FAO 56, em períodos de tempo de 1, 3, 5 e 7 dias.
- Identificar o melhor modelo de estimativa da evapotranspiração de referência para cada localidade.
- Avaliar a influência da altitude e do clima de cada localidade no desempenho dos métodos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido utilizando dados meteorológicos obtidos de estações agrometeorológicas automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada nos três municípios selecionados.

O município de Ilhéus localiza-se, aproximadamente, numa altitude de 78 metros, latitude 14°26' Sul e longitude 39° 02' e 39° 30' Oeste, na zona fisiográfica denominada Região Cacaueira da Bahia e Região Econômica Litoral Sul do Estado da Bahia. O clima deste município é classificado como B2r (úmido com pequena ou nenhuma deficiência hídrica) pela classificação de Thornthwaite.

O município de Anagé encontra-se localizado numa latitude 14°37'00" Sul, longitude 41°08'00" Oeste e altitude de 580 metros, situado na região sudoeste do estado da Bahia. O clima é classificado como semi-árido (D1dB') pela classificação de Thornthwaite com vegetação típica de caatinga, apresentando temperatura média anual de 22,3°C e precipitação pluviométrica média de 656 mm por ano.

O município de Piatã fica situado na região sudoeste do estado da Bahia e está localizado a 13°09'07" Sul de Latitude, 41°46'22" Oeste de Longitude e 1.292 metros de altitude. Tem um clima classificado como C1dB' (subúmido a seco) pela classificação de Thornthwaite.

Na Tabela 1 encontram-se as médias das condições meteorológicas observadas nos anos de 2006 e 2007 para os três municípios.

Tabela 1 – Condições meteorológicas médias referentes aos anos de 2006/2007 para os três municípios selecionados

Média dos Anos de 2006/2007												
Ilhéus												
Meses	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
T. Max (°C)	31,84	32,98	32,33	31,11	29,69	28,03	27,58	27,49	28,14	28,62	30,43	31,23
T. Min (°C)	19,11	19,56	19,37	19,59	17,23	15,42	14,77	15,13	15,76	17,23	18,44	18,58
T. Méd. (°C)	25,47	26,27	25,85	25,35	23,46	21,73	21,17	21,31	21,95	22,92	24,29	24,90
U.R (%)	92,52	92,21	92,67	95,88	94,15	94,93	95,03	93,62	93,45	94,54	93,92	92,87
V. Vento (m/s)	1,05	0,96	0,87	0,70	0,69	0,68	0,68	0,90	1,04	0,97	1,10	1,09
Anagé												
T. Max (°C)	35,99	35,26	33,22	32,48	31,61	30,13	29,85	31,30	32,84	33,51	33,43	33,80
T. Min (°C)	19,26	20,37	19,13	18,84	15,96	14,02	13,01	14,16	15,81	18,28	19,43	18,93
T. Méd. (°C)	27,63	27,82	26,18	25,66	23,79	22,08	21,43	22,73	24,33	25,90	26,43	26,22
U.R (%)	61,44	66,96	76,11	77,01	72,18	68,07	65,64	59,21	54,95	60,90	67,65	70,25
V. Vento (m/s)	3,95	3,72	3,01	2,76	3,11	3,62	3,47	4,02	4,36	4,44	4,28	3,63
Piatã												
T. Max (°C)	29,87	30,13	28,62	28,08	27,10	24,74	24,77	25,40	28,23	28,55	29,76	29,30
T. Min (°C)	16,54	17,44	19,49	17,06	14,05	12,86	11,03	13,12	13,28	16,00	16,75	15,76
T. Méd. (°C)	23,20	23,79	22,55	22,27	20,57	18,80	17,90	19,26	20,75	22,27	23,25	22,54
U.R (%)	79,56	83,57	86,66	91,19	88,32	86,98	85,31	81,60	77,81	79,53	80,34	82,71
V. Vento (m/s)	4,42	3,79	4,14	3,95	4,03	4,80	4,28	5,14	4,63	4,80	4,12	3,91

As estações meteorológicas automáticas de superfície utilizadas para coleta de dados são compostas de uma unidade memorial “data logger”, equipadas com vários sensores. Neste estudo serão utilizados dados de pressão atmosférica, temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa máxima, mínima e média do ar, precipitação, radiação solar e velocidade do vento.

Após a aquisição dos dados meteorológicos foi realizada uma análise visando eliminar os dias que apresentaram valores discrepantes ou falta de algum elemento meteorológico.

4.1. Métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração de referência

A estimativa da ET_0 foi feita utilizando os métodos propostos pela FAO Penman-Monteith – FAO 56, Penman modificado – FAO 24, Radiação FAO 24 Blaney-Cridle, Turc, Priestley-Taylor e o método proposto por Hargreaves-Samani (1985). O método de Penman-Monteith – FAO 56 foi adotado como padrão para avaliar o desempenho dos demais, conforme proposto por SMITH (1991) e ALLEN et al. (1998).

Os valores de ET_0 estimados pelos métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Penman Modificado, Radiação, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani foram obtidos com o uso do aplicativo computacional REF-ET (ALLEN, 2000). Na Figura 2 encontra-se o fluxograma do uso do programa computacional REF-ET.

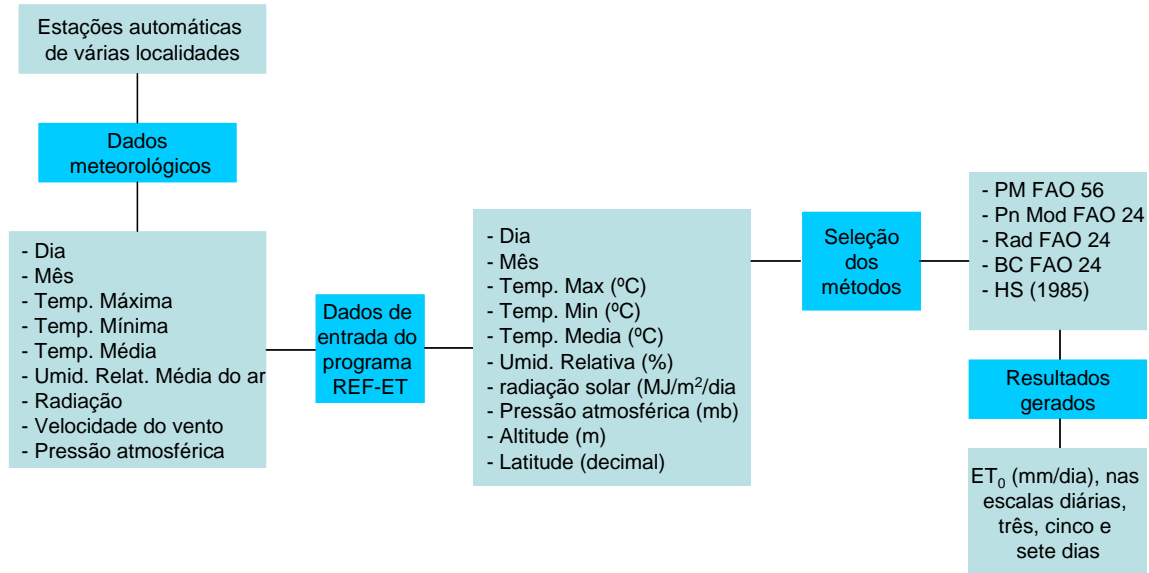


Figura 2 - Fluxograma do uso do programa computacional REF-ET.

4.2.1. Método de Penman-Monteith – FAO 56 (método-padrão)

De acordo com ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989), o modelo de Penman-Monteith apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ET_0 , sendo considerado aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados. A estimativa da ET_0 , pelo referido método foi realizada utilizando-se a equação proposta por ALLEN et al. (1998):

$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

R_n = saldo de radiação à superfície, MJ m⁻² d⁻¹;

G = densidade do fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média do ar a 2 m de altura, °C;

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa;

$e_s - e_a$ = déficit de pressão de saturação de vapores, kPa;

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C⁻¹; e

γ = coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹.

A equação anterior é uma representação dos fatores físicos e fisiológicos que governam o processo de evapotranspiração. Por definição, a cultura de referência é uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m⁻¹ e albedo de 0,23, assemelhando-se à evaporação de uma extensa superfície de grama verde, com altura uniforme, de crescimento ativo e adequada umidade.

4.2.2. Método de Penman modificado (DOORENBOS e PRUITT, 1977)

De acordo com JENSEN (1974), citado por EVANGELISTA (1999), o método de Penman é classificado como um método combinado, pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração. DOORENBOS & PRUITT (1977) modificaram a equação de Penman (1948), dando maior sensibilidade em função do vento; ajustou o fator c , que tem por base as condições climáticas locais; e assumiu $G = 0$, em períodos diários:

$$ET_0 = c \left[W R_n + (1 - W) 0,27 (1 + 0,00625 U_2) (e_s - e_{s(t)}) \right] \quad (2)$$

em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

c = fator de correção da FAO;

W = fator de ponderação que depende da temperatura;

R_n = saldo de radiação, mm d⁻¹;

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, km d⁻¹;

e_s = pressão de saturação de vapor à temperatura média diária, mbar; e

$e_{s(t)}$ = pressão de saturação de vapor à temperatura de ponto de orvalho média, mbar;

O fator de correção da FAO foi ajustado por ALLEN & PRUITT (1991):

$$c = 0,892 - 0,0781U_d + 0,00219U_d R_s + 0,000402UR_{\max} R_s + 0,000196(U_d / U_n)U_d UR_{\max} + 0,0000198(U_d / U_n)U_d UR_{\max} R_s + 0,00000236U_d UR_{\max} R_s - 0,0000086(U_d / U_n)^2 U_d UR_{\max} - 0,0000000292(U_d / U_n)U_d(UR_{\max})^2 R_s - 0,0000161UR_{\max} (R_s)^2 \quad (3)$$

em que:

U_d = velocidade média do vento durante o dia, $m s^{-1}$;

U_n = velocidade média do vento durante a noite, $m s^{-1}$;

UR_{\max} = umidade relativa máxima diária, %;

R_s = radiação solar global à superfície, $mm d^{-1}$; e

$U_d/U_n = 2$, valor recomendado por DOORENBOS & PRUITT (1977) no caso da indisponibilidade de dados.

4.2.3. Método de Blaney-Criddle (PEREIRA et al., 1997)

Blaney e Criddle, em 1950, desenvolveram uma equação com base na simples correlação entre evapotranspiração, temperatura do ar e brilho solar. Posteriormente, ALLEN & PRUITT (1991) ajustaram os coeficientes a e b da equação em função das condições climáticas evitando-se o uso dos nomogramas e interpolações:

$$ET_0 = a + b [p (0,46T + 8,13)] \quad (4)$$

em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência, $mm d^{-1}$;

a e b = parâmetros de correção da FAO;

p = porcentagem de horas de brilho solar diária em relação ao total anual, em dado mês e latitude; e

T = temperatura média do dia, $^{\circ}C$.

Os parâmetros de correção da FAO, a e b, foram ajustados por ALLEN & PRUITT (1991).

$$a = 0,0043UR \min - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (5)$$

$$b = 0,908 - 0,00483UR \min + 0,7949n/N + 0,0768[\ln(Ud + 1)]^2 - \\ 0,0038UR \min n/N - 0,000433UR \min Ud + 0,281\ln(Ud + 1)\ln(n/N + 1) - \\ 0,00975\ln(Ud + 1)[\ln(UR \min + 1)]^2 \ln(n/N + 1) \quad (6)$$

em que:

URmin = umidade relativa mínima, %; e

n/N = razão entre horas de brilho solar real e duração astronômica do dia.

4.2.4. Método de Priestley-Taylor (PT)

O método tem sido usado devido a sua simplicidade em relação aos métodos combinados, por não exigir dados de velocidade de vento e umidade relativa.

$$ET_0 = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (Rn + G) \quad (7)$$

Em que:

ET₀ = Evapotranspiração de referência em mm d⁻¹;

α = fator de ajustamento ao termo advectivo (varia entre 1,26 a 1,35);

Δ = declividade da curva de saturação de vapor, em KPa °C⁻¹;

γ = Coeficiente psicrométrico, em KPa °C⁻¹;

Rn = Saldo da radiação, em MJ m⁻² d⁻¹, e;

G = Fluxo do calor do solo, em MJ m⁻² d⁻¹.

4.2.5 Método de Turc (61)

É uma equação simples, de uso geral, que utiliza apenas a temperatura média do ar e a radiação solar.

$$ET_0 = \frac{0,40 T_{med} (Rs + 50)}{T_{med} + 50} \quad (8)$$

em que:

ET_0 = Evapotranspiração potencial, mm mês⁻¹;

Rs = Radiação solar, Wm⁻²;

T_{med} = Temperatura média, °C.

4.2.6 Método Radiação FAO 24 (Rd FAO 24)

Este método é usado para estimar a ET_0 , usando apenas dados da radiação solar, sendo indicado para situações em que não se dispõe de medidas confiáveis de velocidade do vento e umidade relativa.

$$ET_0 = -0,3 + C W Rs \quad (9)$$

em que:

ET_0 = Evapotranspiração de referencia em mm d⁻¹;

C = fator de calibração. (depende da umidade relativa do ar e da velocidade media do vento);

W = Fator de ponderação, que varia em função da temperatura do ar (°C) e do coeficiente psicrometrico, e ;

Rs = Radiação solar em MJ m⁻² d⁻¹.

4.2.7. Método de Hargreaves-Samani (PEREIRA et al., 1997)

A equação proposta por esses autores, para estimativa da evapotranspiração de referência, é uma alternativa para situações em que não se têm dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento:

$$ET_0 = 0,0023 (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) Ra \quad (10)$$

em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ;

T_{max} = temperatura máxima do dia, $^{\circ}\text{C}$;

T_{min} = temperatura mínima do dia, $^{\circ}\text{C}$;

T_{med} = temperatura média do dia, $^{\circ}\text{C}$; e

R_a = radiação extraterrestre, mm d^{-1} .

4.3. Comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

A análise do desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência foi feita comparando-se os resultados obtidos com os do método de Penman-Monteith – FAO 56.

A metodologia adotada para comparação dos resultados foi aquela proposta por ALLEN et al. (1989), a qual se fundamenta no erro-padrão da estimativa (SEE), calculado pela equação:

$$SEE = \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

em que:

SEE = erro padrão da estimativa, mm d^{-1} ;

y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d^{-1} ;

\hat{y} = evapotranspiração de referência estimada pelos métodos, mm d^{-1} ; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (EEP), do coeficiente de determinação (r^2) e dos parâmetros a e b das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa é aquela que apresenta maior r^2 , menor EEP e b próximo da unidade.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A exatidão está relacionada à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de

concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita.

O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left[\left(|P_i - \bar{O}| \right) + \left(|O_i - \bar{O}| \right) \right]^2} \quad (12)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelos diferentes métodos, mm d⁻¹;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

\bar{O} = média dos valores obtidos pelo método-padrão, mm d⁻¹; e

N = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração de referência também foi realizada utilizando-se o índice de confiança ou desempenho (c), conforme a equação:

$$c = r \cdot d \quad (13)$$

em que r, é o coeficiente de correlação e d é o índice de concordância proposto por WILLMOTT (1985). A classificação dos valores de “c” encontra-se na Tabela 2:

Tabela 2 – Classificação do índice de confiança ou de desempenho “c”

Valores de “c”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
≤ 0,30	Péssimo

Fonte: CAMARGO & SENTELHA (1997)

Os valores de evapotranspiração de referência obtidos para as três localidades do estado da Bahia foram comparados com as do método padrão de Penman-Monteith – FAO 56 em períodos diários, 3, 5 e 7 dias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a e b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa de erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários, três, cinco e sete dias, referentes à média dos anos de 2006 e 2007, localidade de Piatã – BA.

TABELA 3. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários, três, cinco e sete dias localidade de Piatã - BA.

Métodos	a	b	r^2	EEP	r	d	c	Classificação*	ET_0 (mm)
Diária									
FAO 56 PM									4,50
Penman. Mod.	- 1,047	1,442	0,98	1,13	0,99	0,87	0,86	Muito Bom	5,45
Radiação	0,257	1,019	0,89	0,55	0,94	0,95	0,89	Muito Bom	4,85
Blaney-Cridle	- 0,060	0,969	0,95	0,33	0,98	0,98	0,96	Ótimo	4,30
Harg-Samani	2,108	0,573	0,49	0,89	0,70	0,82	0,58	Mediano	4,61
Priestley-Taylor	1,115	0,649	0,75	0,78	0,86	0,87	0,74	Bom	4,04
Turc	1,078	0,608	0,82	0,90	0,90	0,82	0,74	Bom	3,82

3 Dias									
FAO 56 PM									4,50
Penman. Mod.	- 0,948	1,420	0,98	1,07	0,99	0,85	0,84	Muito Bom	5,45
Radiação	0,322	1,004	0,93	0,45	0,96	0,96	0,92	Ótimo	4,85
Blaney-Cridle	- 0,100	0,933	0,96	0,29	0,98	0,98	0,96	Ótimo	4,30
Harg-Samani	1,622	0,680	0,58	0,73	0,76	0,86	0,66	Mediano	4,69
Priestley-Taylor	0,946	0,689	0,79	0,69	0,89	0,87	0,78	Bom	4,04
Turc	1,088	0,606	0,88	0,84	0,94	0,81	0,76	Bom	3,82

5 Dias									
FAO 56 PM									4,51
Penman. Mod.	- 0,895	1,407	0,99	1,04	0,99	0,84	0,83	Muito Bom	5,45
Radiação	- 0,696	0,477	0,95	0,41	0,97	0,96	0,93	Ótimo	4,85
Blaney-Cridle	0,217	0,907	0,97	0,28	0,98	0,98	0,96	Ótimo	4,30
Harg-Samani	1,324	0,747	0,62	0,65	0,79	0,88	0,69	Mediano	4,65
Priestley-Taylor	0,909	0,694	0,80	0,66	0,89	0,87	0,77	Bom	4,04
Turc	1,167	0,588	0,91	0,82	0,95	0,79	0,75	Bom	3,82

7 Dias									
FAO 56 PM									4,49
Penman. Mod.	- 0,851	1,398	0,99	1,03	0,99	0,82	0,81	Muito Bom	5,43
Radiação	0,553	0,953	0,95	0,40	0,97	0,95	0,93	Ótimo	4,83
Blaney-Cridle	0,301	0,888	0,97	0,27	0,98	0,98	0,96	Ótimo	4,29
Harg-Samani	1,060	0,805	0,64	0,61	0,80	0,89	0,71	Bom	4,68
Priestley-Taylor	0,831	0,711	0,80	0,63	0,89	0,86	0,77	Bom	4,03
Turc	1,180	0,585	0,91	0,80	0,95	0,78	0,74	Bom	3,81

A análise dos resultados obtidos na escala diária para a localidade de Piatã – BA, o melhor método dentre os estudados foi o de Blaney-Cridle com Ótimo

desempenho ($c = 0,96$; $d = 0,98$; $EEP = 0,33$) e elevada precisão ($r = 0,98$), com estimativa da ETo próximo do obtido pelo método padrão FAO56-PM. Com o desempenho muito bom ficaram os métodos Penman Modificado FAO 24 e Radiação FAO 24. Já os métodos Priestley-Taylor e Turc apresentaram um desempenho bom, com índice de confiança igual a 0,74. O método Hargreaves-Samani apresentou o pior índice de desempenho, sendo classificado como mediano. Esse método subestimou os valores de evapotranspiração de referência obtidos pelo método padrão. Estudos conduzidos por CONCEIÇÃO (2003) para região do baixo Rio Grande – SP mostrou que o Hargreaves-Samani apresentou melhor desempenho do que o método de Blaney-Criddle, em que este apresentou um desempenho considerado mediano. Para a cidade de Piracicaba, o método de Hargreaves-Samani também apresentou erros elevados ($c = 0,45$; $r = 0,68$ e $d = 0,67$) não sendo recomendado para as condições climáticas do local de estudo (SANTIAGO, 2001).

A análise de resultados para a Localidade de Piatã, nas escalas de três, cinco e sete dias, os melhores desempenhos foram para os métodos Blaney-Criddle ($c = 0,96$) e Radiação FAO 24 ($c = 0,92$), classificados como Ótimo, com estimativas de erro padrão iguais a 0,28 mm/dia e 0,45 mm/dia respectivamente, com índices de concordância próximos da unidade, caracterizando uma concordância quase perfeita. Sendo assim, estes métodos não apresentam restrições de uso para as condições climáticas do local, onde se realizou a pesquisa. Os demais métodos apresentaram desempenhos variando de Muito bom a Bom, porém com valores de EEP um pouco elevados. Há restrição ao método de Hargreaves-Samani, por apresentar índice mediano de desempenho ($c = 0,66$) e superestimar a ETo obtida pelo método padrão. Para as condições de Viçosa – MG, TAGLIAFERRE (2006) obteve resultados semelhantes.

Nas Figuras de 2 a 5 encontram-se as correlações entre valores de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 na escala diária, três, cinco e sete dias para a localidade de Piatã – BA.

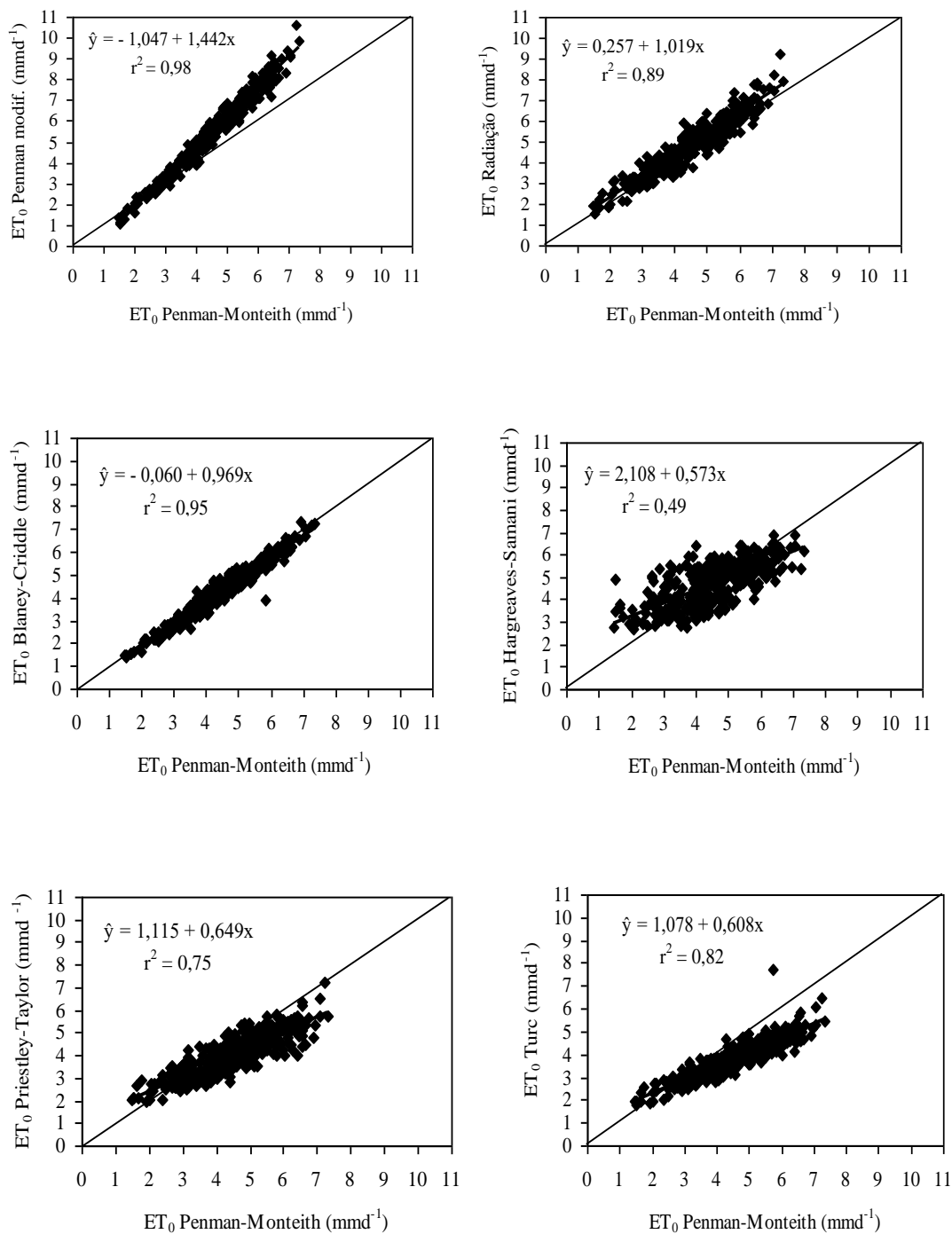


Figura 2. Correlações entre valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

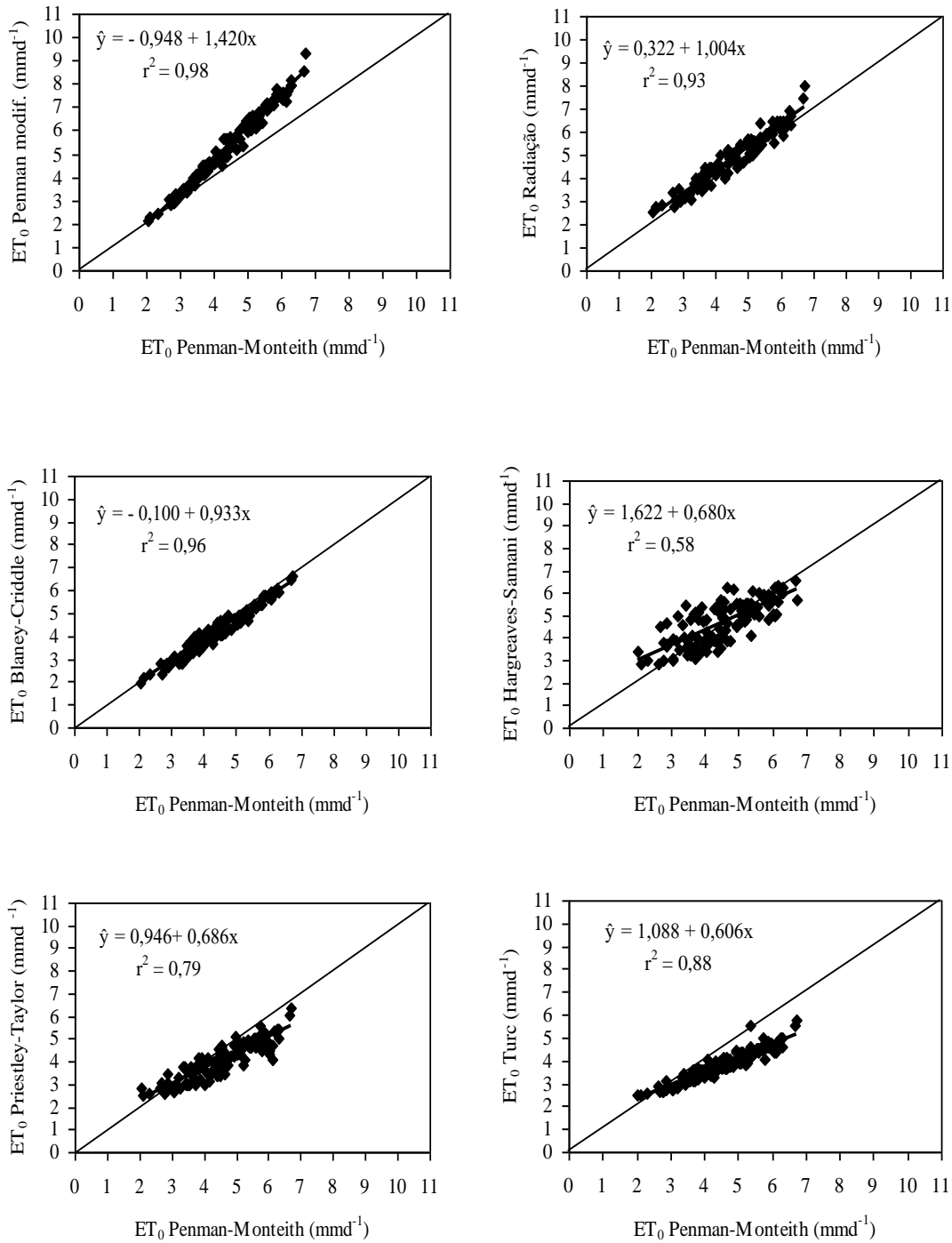


Figura 3. Correlações entre valores de três dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

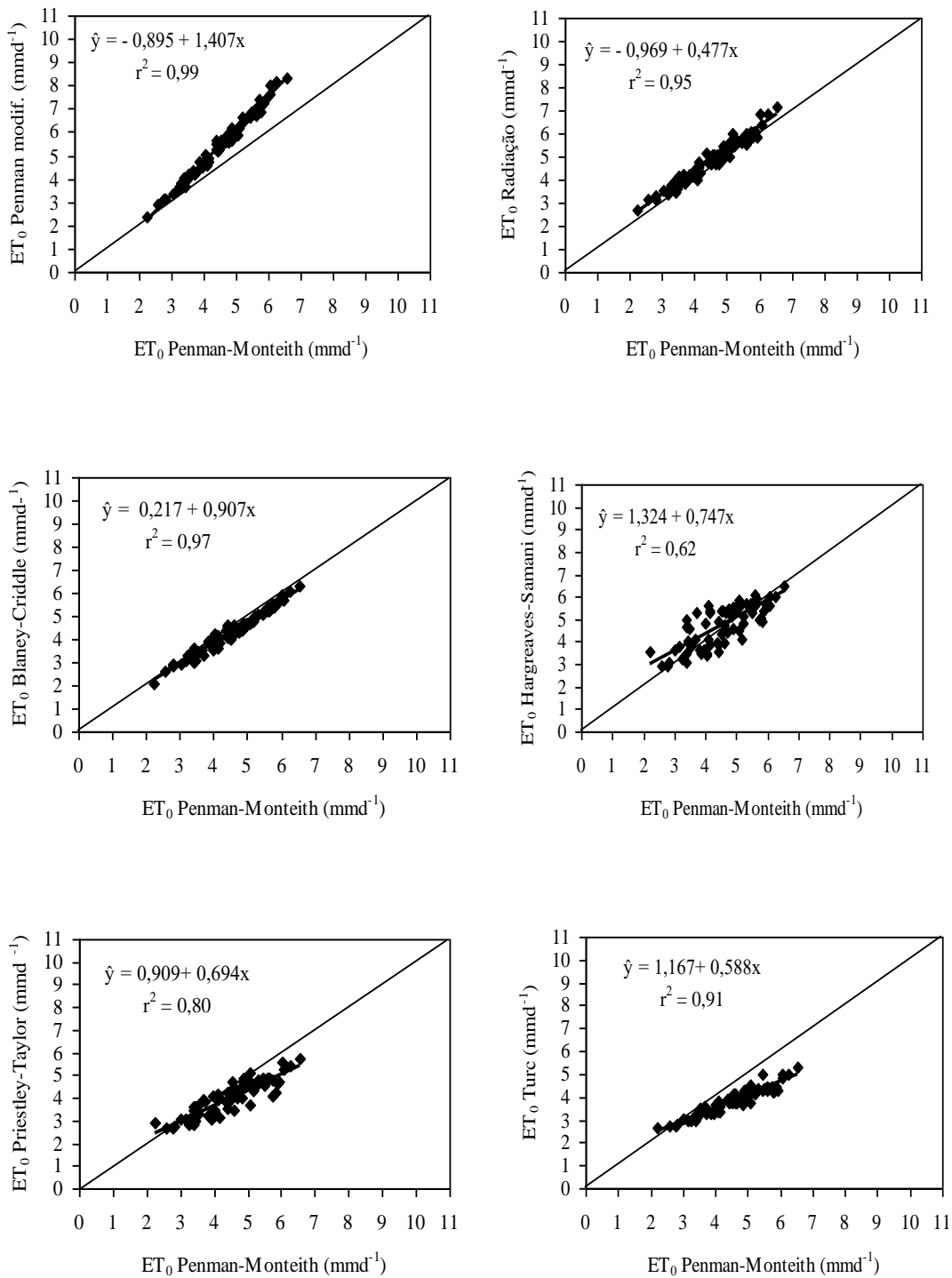


Figura 4. Correlações entre valores de cinco dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

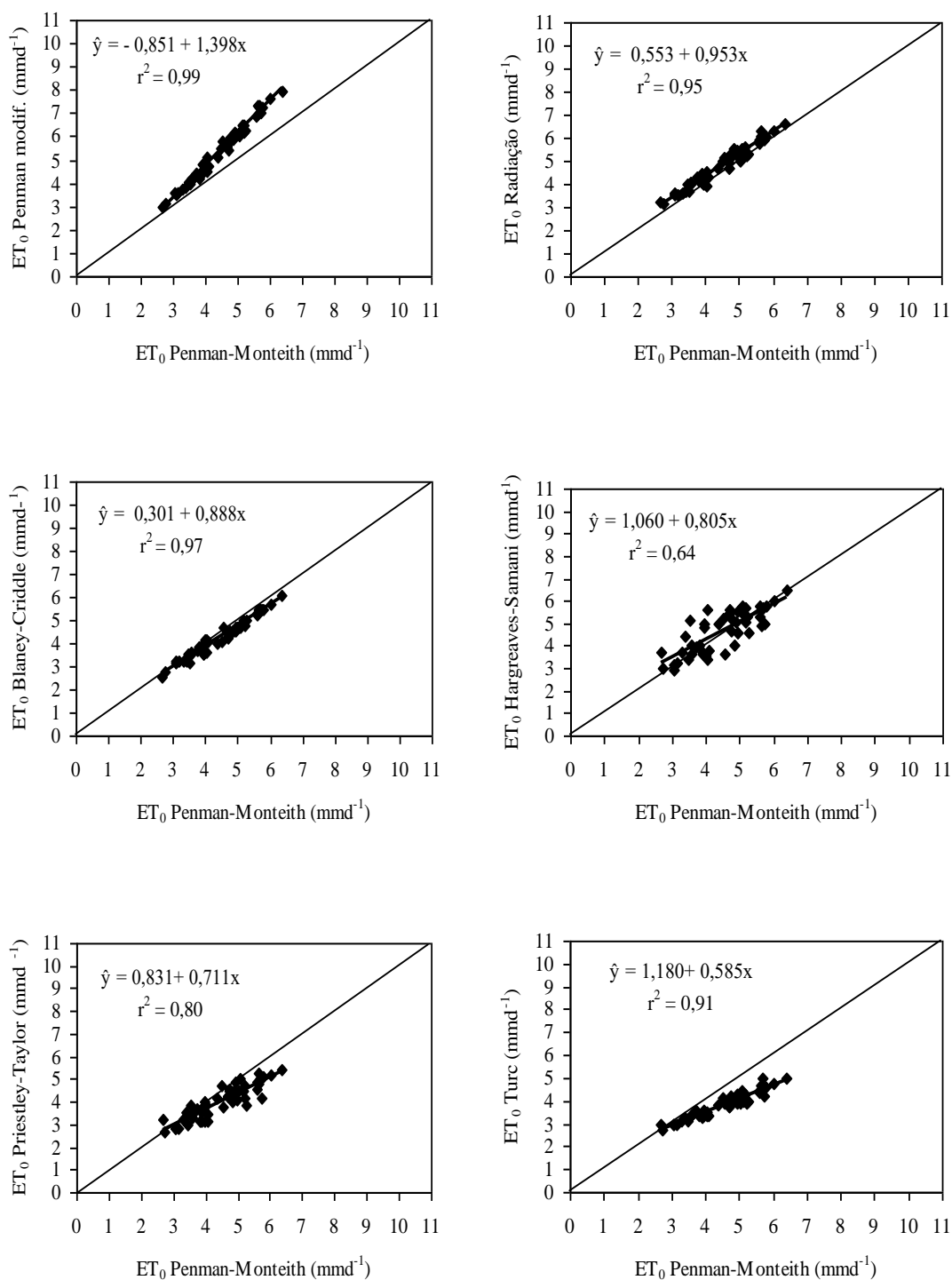


Figura 5. Correlações entre valores de sete dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

Observa-se na análise dos gráficos que o método de Penman Modificado subestimou a ET₀ para valores menores do que 3,0 mmd⁻¹, ocorrendo comportamento contrário para valores maiores (Figura 2). O método da Radiação FAO 24 superestimou a evapotranspiração de referência, enquanto que os

métodos de Priestley-Taylor e Turc subestimaram. O método Hargreaves-Samani apresentou maior dispersão dos dados de evapotranspiração de referência em torno da linha de tendência, não acompanhando a reta de valores 1:1. (Figuras 2; 3; 4 e 5)

As linhas de tendências obtidas para os métodos de Blaney-Criddle e da radiação acompanharam praticamente a linha de valores 1:1 para todos os valores de evapotranspiração de referência. Isso demonstra que os valores obtidos por esses métodos estão bem correlacionados com os do método padrão.

Na Tabela 4 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a e b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa de erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários referentes aos anos de 2006 e 2007, localidade de Anagé – BA.

TABELA 4. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários, três, cinco e sete dias localidade de Anagé – BA.

Métodos	a	b	r^2	EEP	r	d	c	Classificação*	ET_0 (mm)
Diária									
FAO 56 PM									6,04
Penman. Mod.	- 1,296	1,391	0,96	1,29	0,98	0,88	0,86	Muito Bom	7,10
Radiação	- 0,829	1,078	0,84	0,78	0,92	0,94	0,86	Muito Bom	5,68
Blaney-Criddle	0,114	0,927	0,91	0,55	0,95	0,96	0,92	Ótimo	5,71
Harg-Samani	2,136	0,565	0,78	1,05	0,78	0,82	0,64	Mediano	5,55
Priestley-Taylor	0,515	0,632	0,59	1,95	0,59	0,64	0,38	Mau	4,33
Turc	0,777	0,578	0,66	1,97	0,81	0,63	0,52	Mediano	4,27

3 Dias									
FAO 56 PM									6,03
Penman. Mod.	- 1,222	1,379	0,97	1,23	0,99	0,87	0,87	Muito Bom	7,10
Radiação	- 0,676	1,052	0,88	0,65	0,94	0,59	0,56	Mediano	5,67
Blaney-Criddle	0,277	0,900	0,94	0,48	0,97	0,54	0,52	Mediano	5,71
Harg-Samani	1,743	0,629	0,67	0,92	0,82	0,64	0,52	Mediano	5,54
Priestley-Taylor	0,445	0,644	0,60	1,92	0,78	0,92	0,72	Bom	4,33
Turc	0,866	0,834	0,70	1,94	0,84	0,93	0,78	Bom	4,26

5 Dias									
FAO 56 PM									6,00
Penman. Mod.	- 1,262	1,387	0,96	1,24	0,98	0,86	0,85	Muito Bom	7,07
Radiação	- 0,717	1,061	0,87	0,65	0,93	0,95	0,88	Muito Bom	5,65
Blaney-Criddle	0,278	0,899	0,93	0,48	0,96	0,96	0,93	Ótimo	5,68
Harg-Samani	1,769	0,625	0,65	0,92	0,81	0,84	0,68	Mediano	5,52
Priestley-Taylor	0,431	0,648	0,58	1,89	0,76	0,63	0,48	Sofrível	4,33
Turc	0,837	0,568	0,70	1,92	0,84	0,61	0,51	Mediano	4,24

7 Dias									
FAO 56 PM									6,06
Penman. Mod.	- 1,086	1,357	0,97	1,21	0,98	0,85	0,84	Muito Bom	7,14
Radiação	- 0,292	0,990	0,88	0,57	0,94	0,95	0,89	Muito Bom	5,71
Blaney-Criddle	0,848	0,594	0,94	0,46	0,97	0,96	0,93	Ótimo	5,74
Harg-Samani	1,278	0,708	0,72	0,82	0,85	0,87	0,74	Bom	5,57
Priestley-Taylor	0,476	0,640	0,56	1,90	0,75	0,60	0,45	Sofrível	4,36
Turc	0,524	1,108	0,67	1,94	0,82	0,58	0,48	Sofrível	4,29

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1 verifica-se que os métodos avaliados apresentaram desempenho variando de “mau” a “ótimo” para estimativa da ET_0 na escala diária e que a exceção do método de Penman modificado, todos os métodos subestimaram os valores de ET_0 obtidos pelo método padrão. O método de Blaney-Criddle apresentou o melhor índice de desempenho, sendo classificado como “ótimo”, com valor de estimativa do erro padrão igual a 0,55 $mm d^{-1}$ e uma subestimativa média de ET_0 igual a 0,33 $mm d^{-1}$. Destaca-se também, que as equações de regressão obtidas para esse método apresentaram valores dos coeficientes a e b próximo a zero e um, respectivamente, evidenciando o melhor desempenho.

Os métodos Penman Modificado e Radiação obtiveram valores de r^2 igual a 0,96 e 0,84 respectivamente, sendo classificados como “muito bom”. Hargreaves-Samani e Turc demonstraram desempenho mediano. O método de Hargreaves-Samani subestimou os valores de ET_0 obtidos pelo método padrão, evidenciando comportamento contrário quando é empregado em climas úmidos. JENSEN et al. (1990), citam que os métodos que se baseiam na temperatura do ar e na radiação, caso de Hargreaves-Samani, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência em 15 a 25%, em climas úmidos. Dentre os métodos estudados o que apresentou pior desempenho, foi o método de Priestley-Taylor classificado como “mau” ($c = 0,38$), justificado pelo seu alto valor de estimativa de erro padrão ($1,95 \text{ mm d}^{-1}$).

A análise dos resultados obtidos para período de estudos, localidade de Anagé – BA, na escala de três, cinco e sete dias o método de Blaney-Criddle apresentou o melhor índice de desempenho (Ótimo) sendo acompanhado por Penman Modificado e Radiação que apresentaram índice médio de “c” $> 0,81$ classificando-os com desempenho Muito Bom, e seus valores de EEP baixos, o que não restringe os métodos para o uso na estimativa da ET_0 para as condições climáticas do local de estudo. Quanto aos métodos de Priestley-Taylor e Turc apresentaram valores médios elevados de EEP ($1,89 \text{ mm d}^{-1}$ e $1,92 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente) o que restringe seu uso na estimativa de ET_0 para o local, sendo necessários novos estudos. BRAGANÇA (2007) para a localidade de Sooretama-ES, no período chuvoso, obteve resultados contrários, onde os métodos Priestley-Taylor e Turc apresentaram melhor desempenho.

Nas Figuras de 6 a 9 encontram-se as correlações entre valores de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 na escala diária, três, cinco e sete dias para a localidade de Anagé – BA.

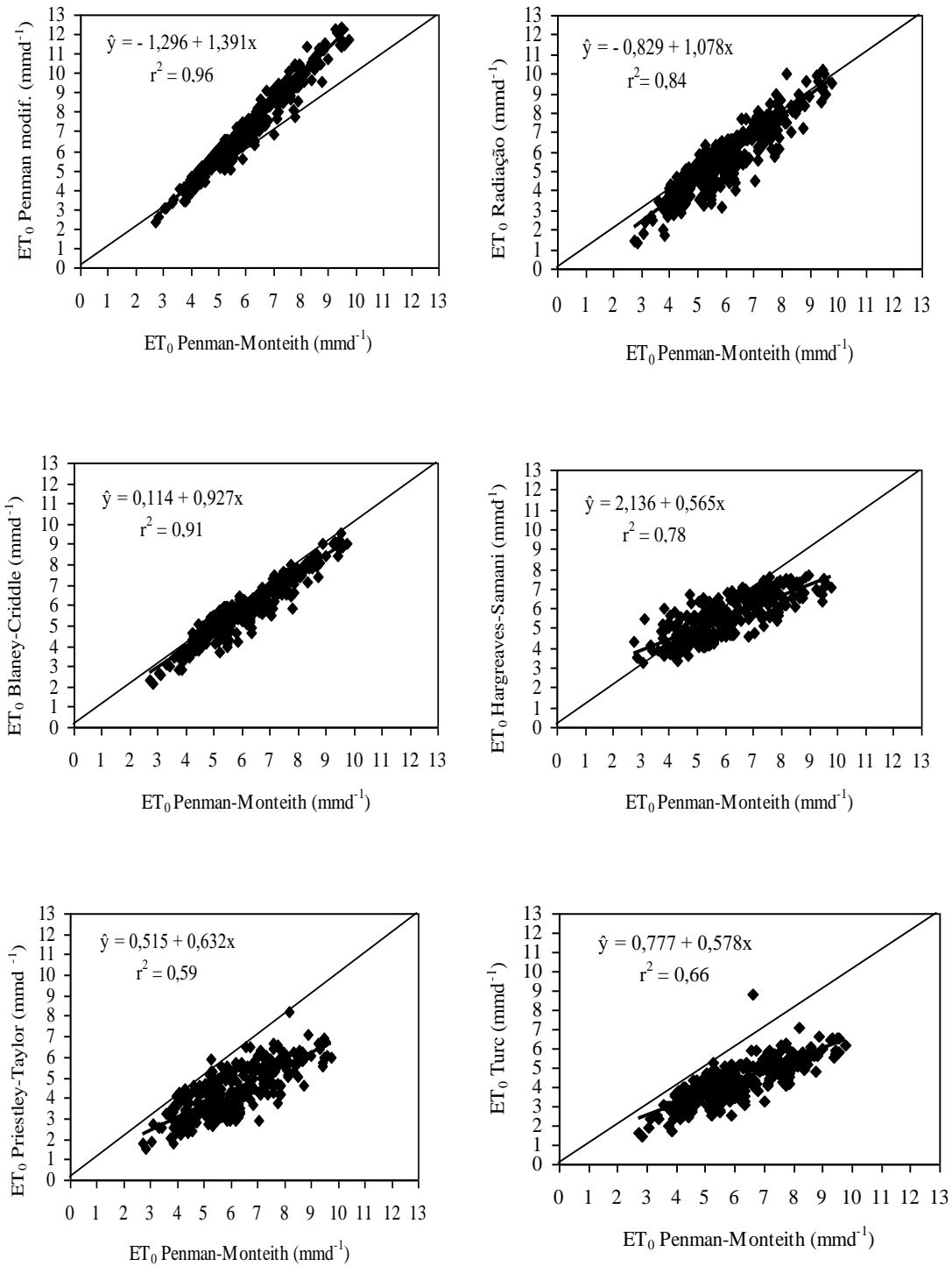


Figura 6. Correlações entre valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

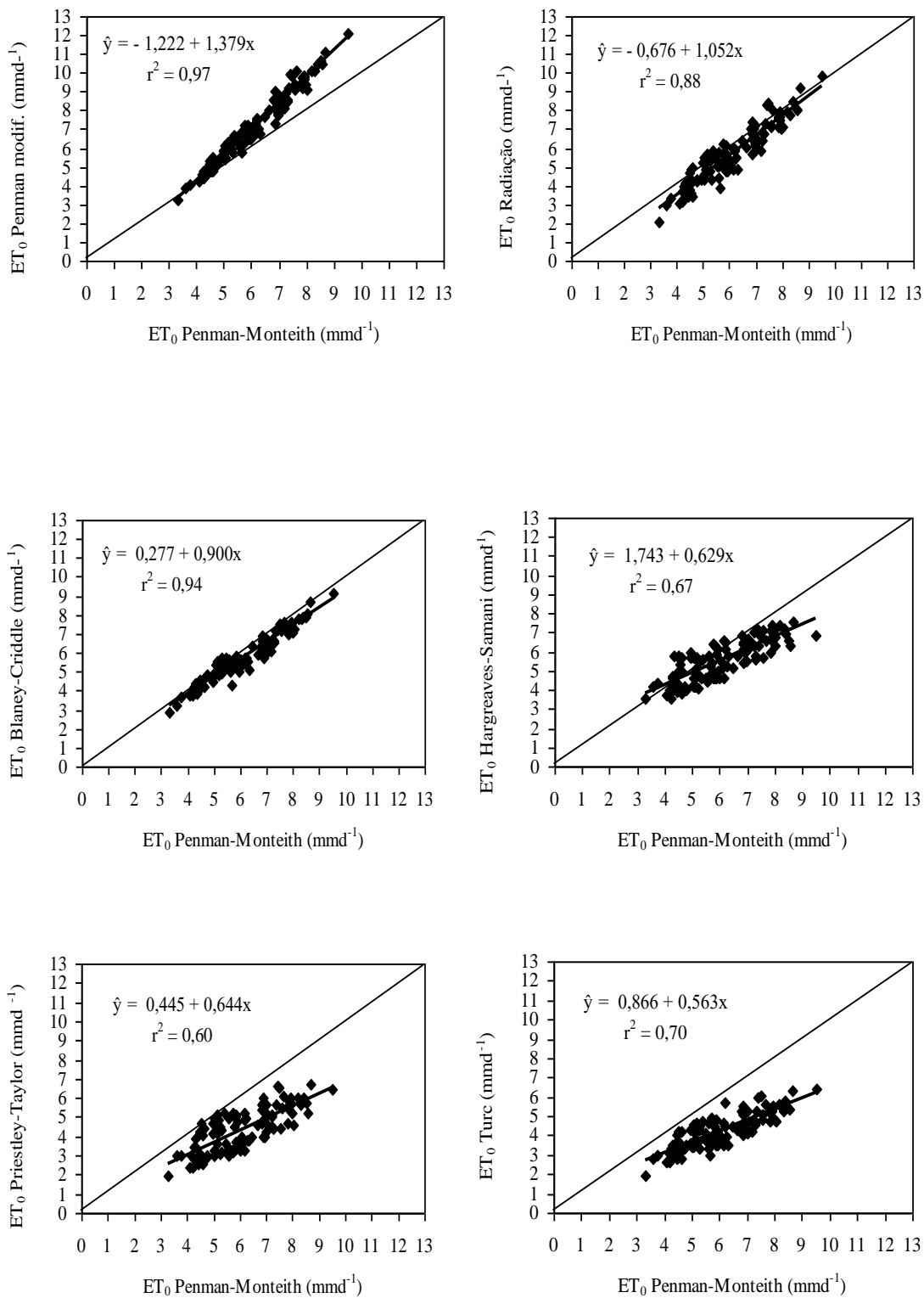


Figura 7. Correlações entre valores de três dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

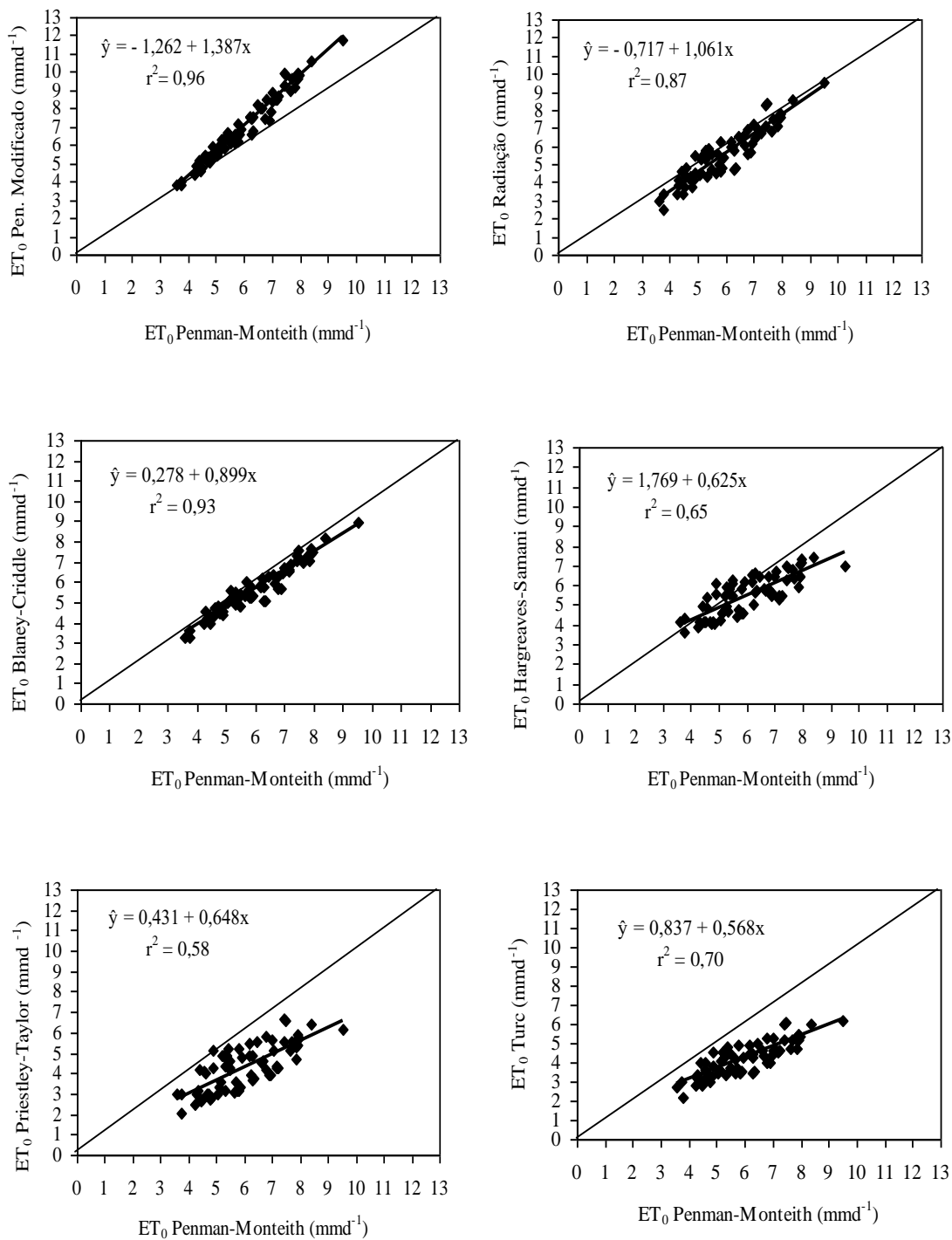


Figura 8. Correlações entre valores de cinco dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

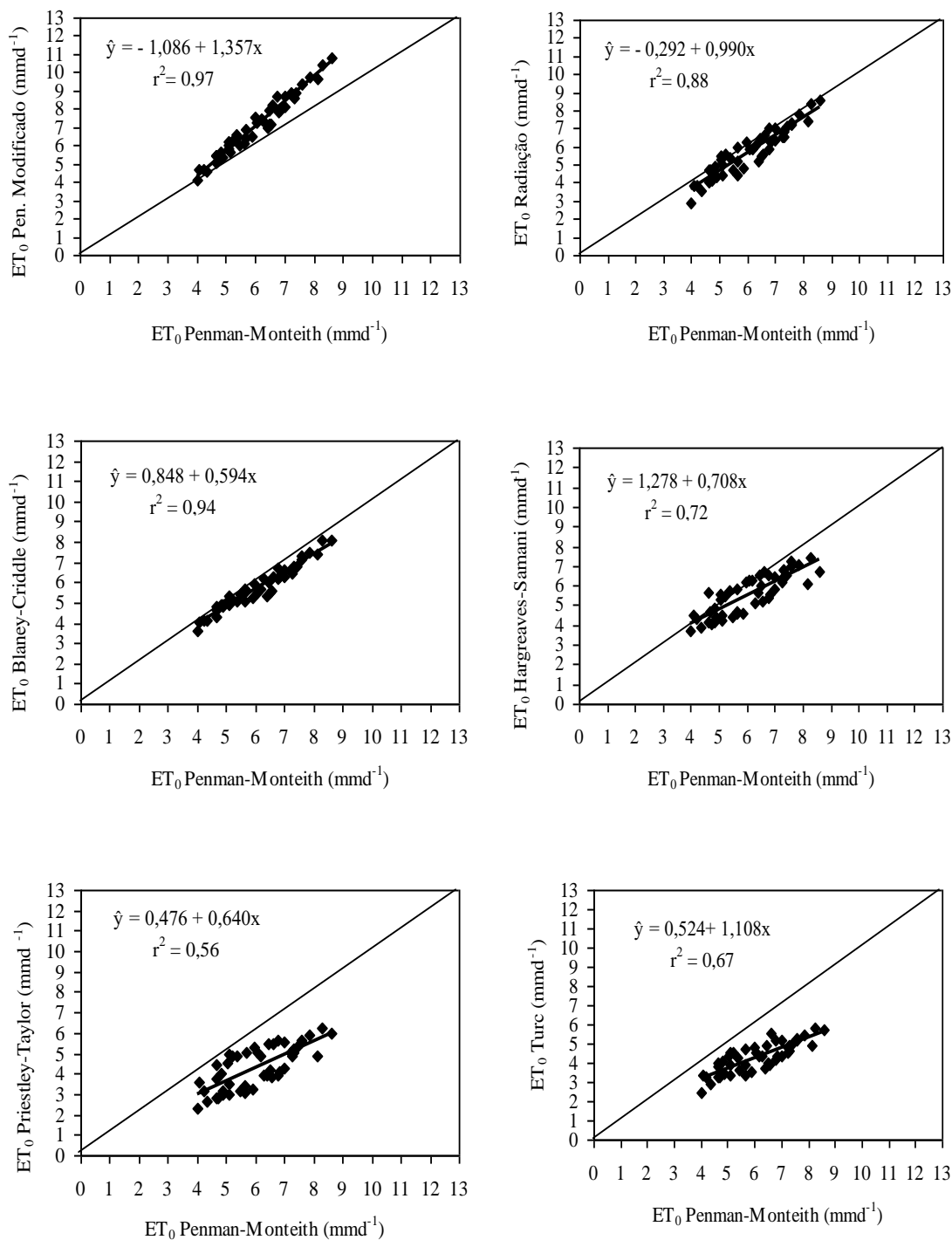


Figura 9. Correlações entre valores de sete dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

Observa-se nas Figuras 6 a 9 que o método Penman Modificado superestimou a evapotranspiração de referência para valores acima de 4 mm d⁻¹,

ocorrendo comportamento contrário para valores menores. Os métodos de Radiação, Priestley-Taylor e Turc apresentaram subestimativa da evapotranspiração de referência em quase todas escalas. O método de Hargreaves-Samani foi, dentre os métodos estudados, o que apresentou maior dispersão dos pontos, em que seus valores não acompanharam a reta de valores 1:1.

Dentre os métodos observados, o de Blaney-Criddle e Radiação foram os que apresentaram menor dispersão dos dados em torno da linha de tendência, sendo que a esta dispersão acompanhou a reta de valores 1:1, tendo por base o método de Penman-Monteith - FAO 56 o que indica uma boa correlação entre estes e o método padrão.

Na Tabela 5 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a e b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa de erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários referentes aos anos de 2006 e 2007, localidade de Ilhéus – BA.

TABELA 5. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância (d), índice de confiança ou desempenho (c) para valores de ET_0 diários, três, cinco e sete dias localidade de Ilhéus – BA.

Métodos	a	b	r^2	EEP	r	d	c	Classificação*	ET_0 (mm)
Diária									
FAO 56 PM									3,12
Penman. Mod.	- 0,778	1,346	0,99	0,45	0,99	0,96	0,95	Ótimo	3,42
Radiação	- 0,375	1,248	0,96	0,51	0,98	0,94	0,92	Ótimo	3,52
Blaney-Criddle	- 0,082	0,865	0,90	0,57	0,95	0,90	0,85	Muito Bom	2,62
Harg-Samani	2,164	0,855	0,63	1,82	0,79	0,55	0,43	Sufrível	4,83
Priestley-Taylor	0,217	1,151	0,98	0,72	0,99	0,88	0,87	Muito Bom	3,81
Turc	0,541	0,951	0,93	0,45	0,96	0,94	0,90	Muito Bom	3,51

3 Dias									
FAO 56 PM									3,12
Penman. Mod.	- 0,708	1,324	0,99	0,41	0,99	0,95	0,95	Ótimo	3,42
Radiação	- 0,175	1,185	0,97	0,46	0,97	0,93	0,91	Ótimo	3,52
Blaney-Criddle	0,018	0,833	0,92	0,56	0,92	0,87	0,80	Bom	2,62
Harg-Samani	1,568	1,047	0,77	1,78	0,77	0,54	0,41	Sufrível	4,83
Priestley-Taylor	0,200	1,157	0,98	0,71	0,98	0,85	0,84	Muito Bom	3,81
Turc	0,695	0,902	0,96	0,42	0,96	0,93	0,89	Muito Bom	3,51

5 Dias									
FAO 56 PM									3,12
Penman. Mod.	- 0,670	1,312	1,00	0,39	1,00	0,95	0,95	Ótimo	3,42
Radiação	- 0,094	1,158	0,97	0,45	0,98	0,93	0,91	Ótimo	3,52
Blaney-Criddle	0,118	0,801	0,93	0,56	0,96	0,86	0,83	Muito Bom	2,62
Harg-Samani	1,348	1,117	0,82	1,77	0,91	0,53	0,48	Sufrível	4,83
Priestley-Taylor	0,145	1,175	0,99	0,71	0,99	0,84	0,84	Muito Bom	3,81
Turc	0,702	0,900	0,97	0,42	0,95	0,92	0,88	Muito Bom	3,51

7 Dias									
FAO 56 PM									3,12
Penman. Mod.	- 0,646	1,304	1,00	0,38	1,00	0,95	0,95	Ótimo	3,42
Radiação	- 0,001	1,128	0,97	0,44	0,98	0,93	0,91	Ótimo	3,52
Blaney-Criddle	0,164	0,786	0,93	0,56	0,96	0,85	0,81	Muito Bom	2,62
Harg-Samani	1,143	1,184	0,85	1,78	0,92	0,52	0,48	Sufrível	4,83
Priestley-Taylor	0,122	1,183	0,99	0,72	0,99	0,83	0,83	Muito Bom	3,81
Turc	0,748	0,885	0,97	0,42	0,98	0,92	0,90	Muito Bom	3,51

A análise dos resultados obtidos para a localidade de Ilhéus, na escala diária, os melhores métodos foram Penman modificado e Radiação (c = 0,95 e 0,92 respectivamente) classificando-os com desempenho Ótimo, justificado também pelos seus valores de r^2 próximos a 1 e baixos valores de erro padrão de estimativa. Com relação aos métodos de Blaney-Criddle, Priestley-Taylor e Turc, todos apresentaram desempenho considerado Muito Bom. Blaney-Criddle subestimou a ET_0 em 0,50 mm d^{-1} em relação ao método padrão, enquanto Priestley-Taylor e Turc superestimaram. O método de Hargreaves-Samani foi o

que obteve pior desempenho ($c = 0,43$ e $EEP = 1,82 \text{ mm d}^{-1}$) superestimando em $1,71 \text{ mm d}^{-1}$ a ET_o , sendo classificado como sofrível e restringindo seu uso para as condições climáticas do local de estudo. Resultados similares aos obtidos por BRAGANÇA (2007) em estudos realizados na localidade de Fazenda experimental Bananal do Norte – Cachoeiro do Itapemirim–ES.

A análise dos resultados obtidos para período de estudos, localidade de Ilheus – BA, na escala de três, cinco e sete dias os métodos de Penman modificado e Radiação apresentaram índices de $r^2 > 0,97$ e índices de “c” $> 0,90$ justificando seus melhores desempenhos sendo classificados como Ótimo. Os métodos de Blaney-Criddle, Priestley-Taylor e Turc foram classificados com Muito Bom, porém, com elevados valores de EEP, o que pode indicar a necessidade de novos estudos. Hargreaves-Samani ($c = 0,48$) com valores de $EEP = 1,78 \text{ mm d}^{-1}$ foi o que apresentou pior desempenho sendo classificado como sofrível.

Nas Figuras de 10 a 13 encontram-se as correlações entre valores de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 na escala diária, três, cinco e sete dias para a localidade de Anagé – BA.

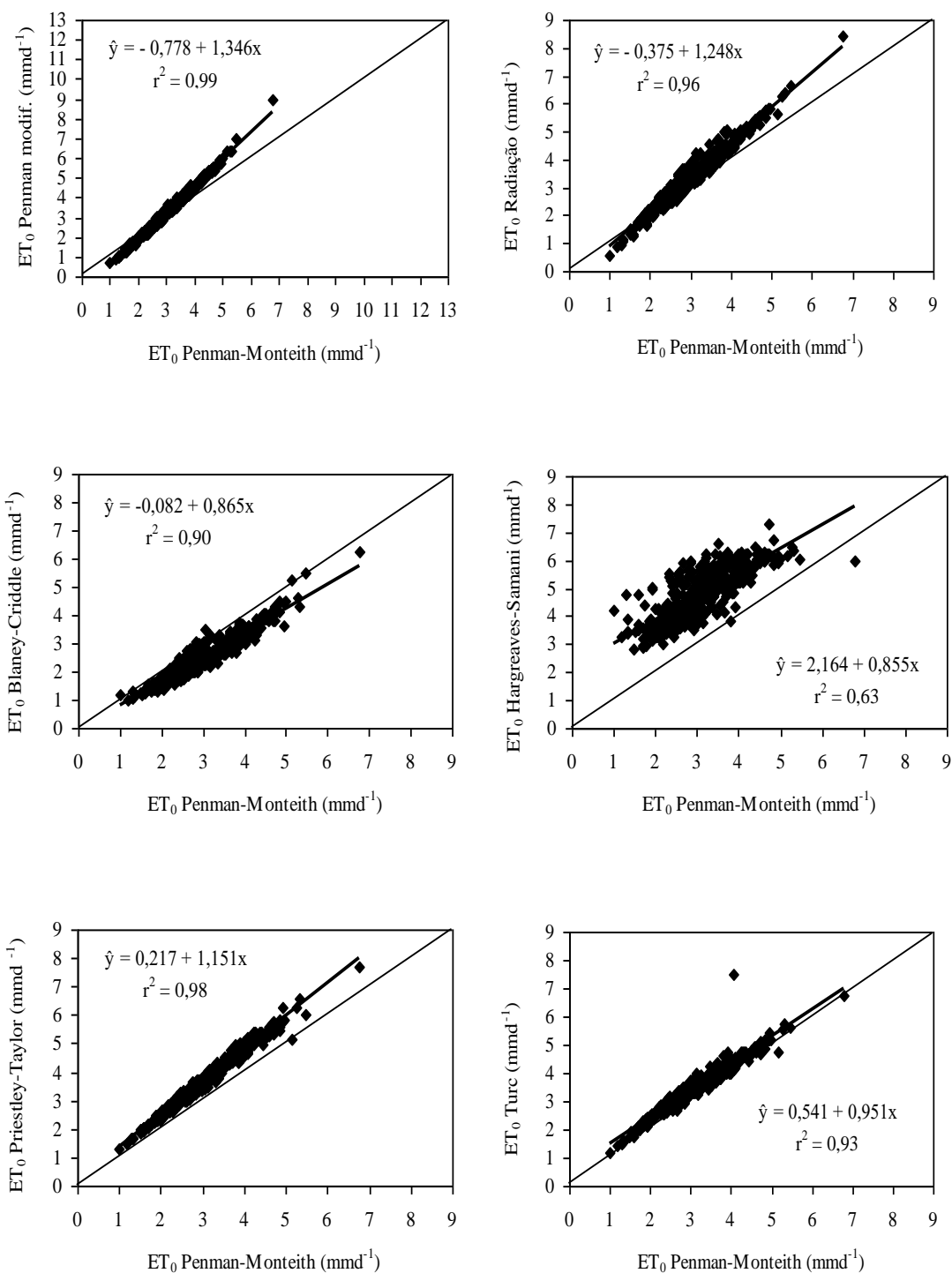


Figura 10. Correlações entre valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

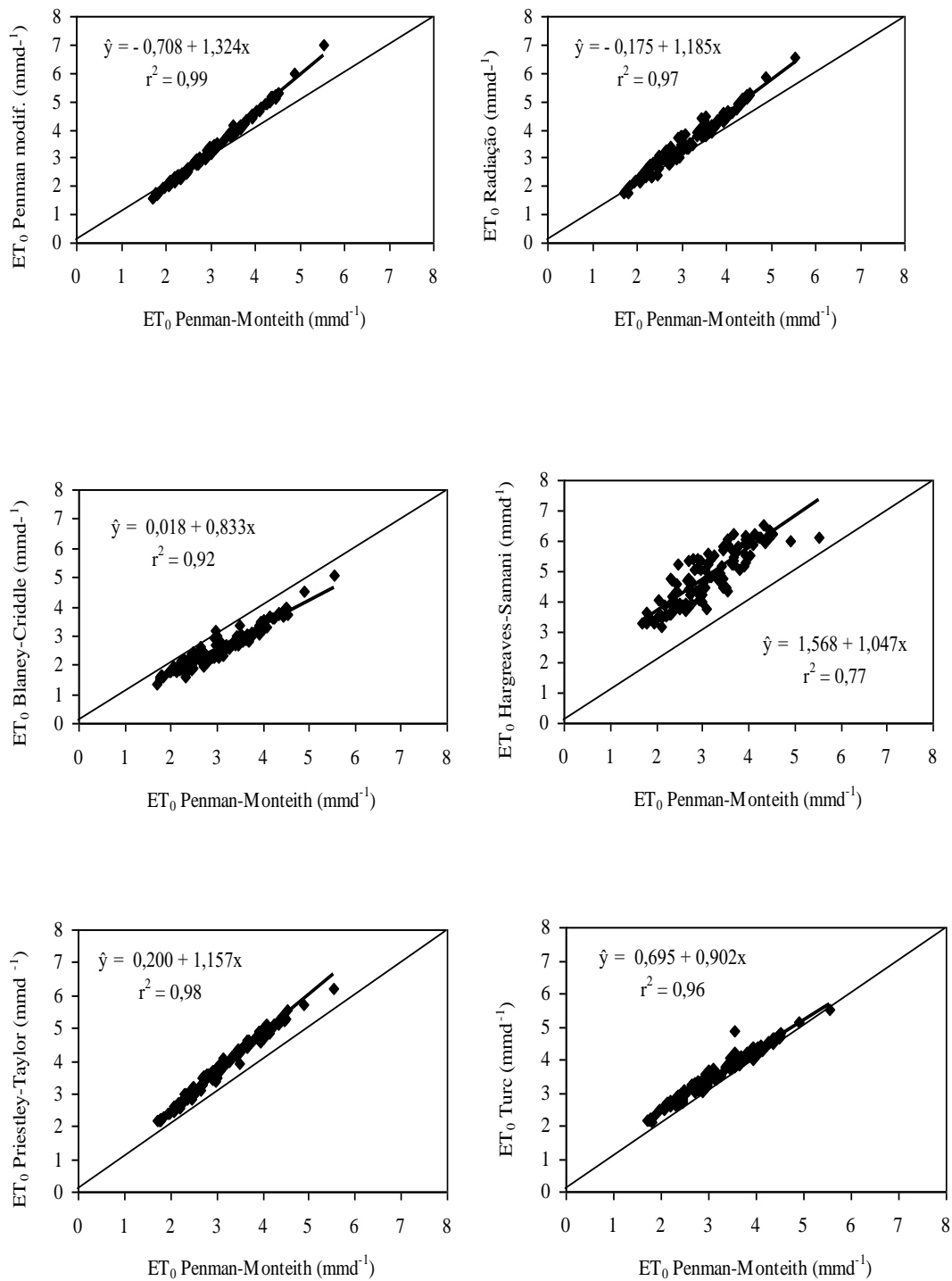


Figura 11. Correlações entre valores de três dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

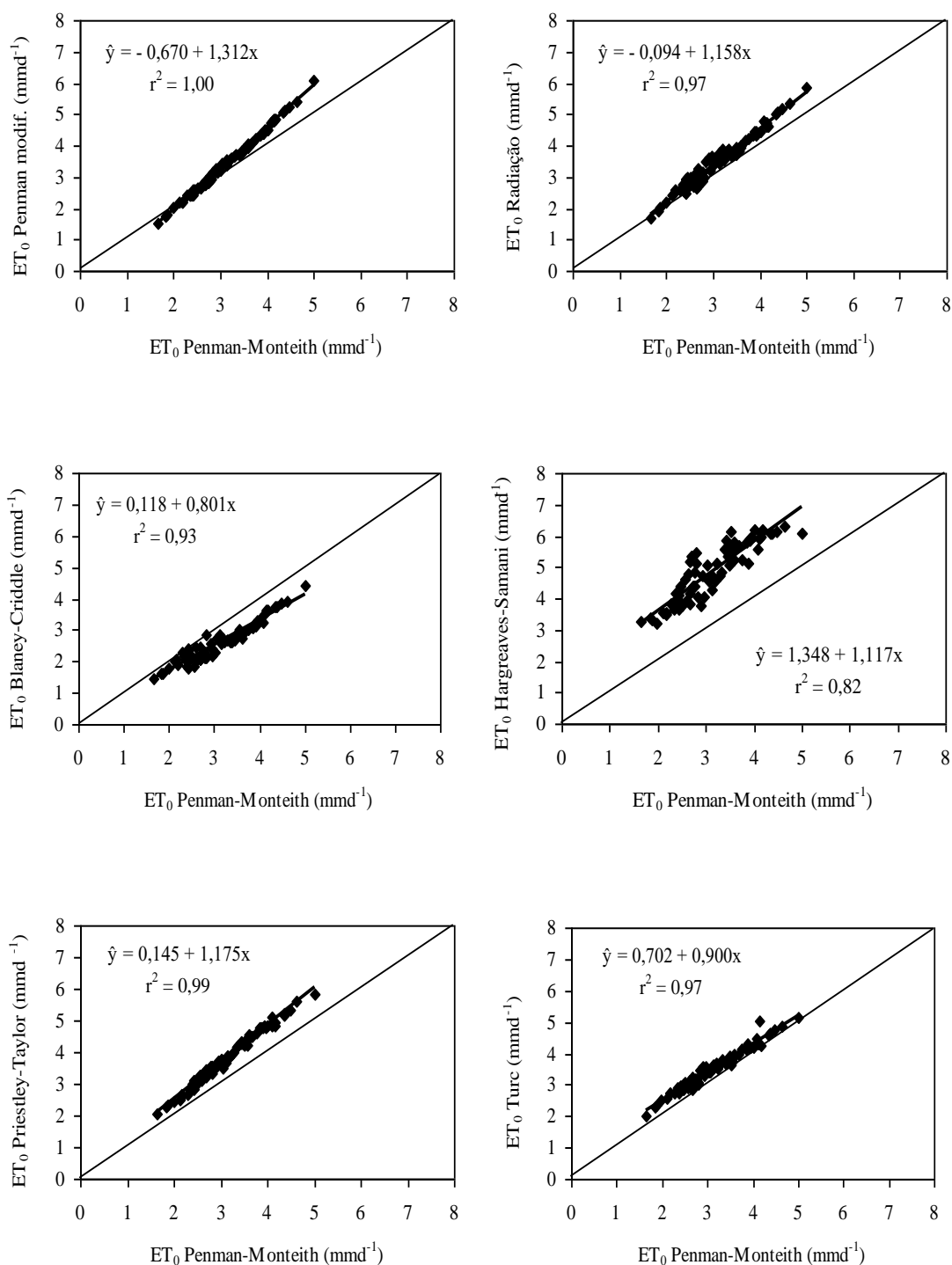


Figura 12. Correlações entre valores de cinco dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

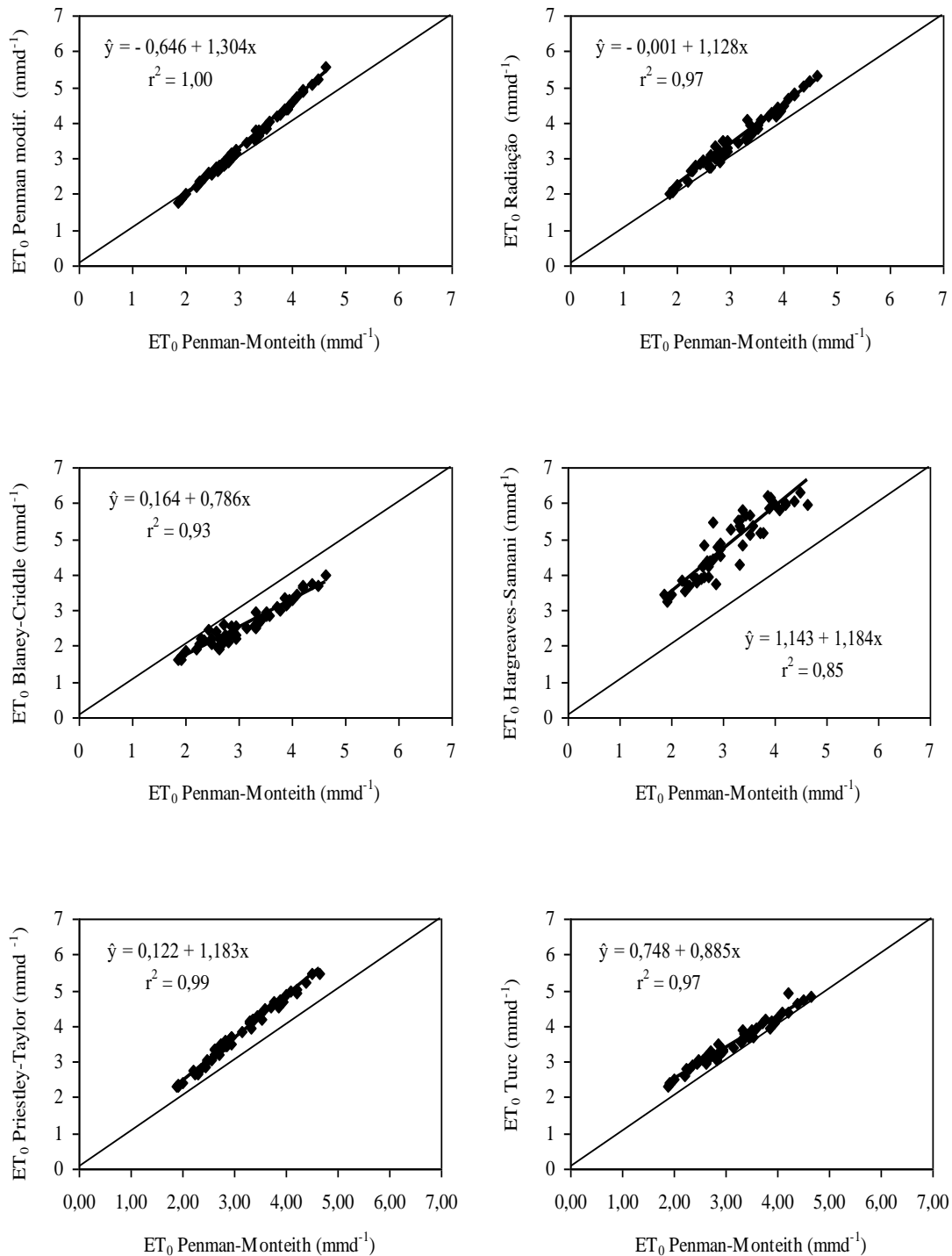


Figura 13. Correlações entre valores de sete dias de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

Observa-se nas Figuras 10 a 13 que o método Hargreaves-Samani superestimou a evapotranspiração de referência em todas as escalas e foi o método que apresentou maior dispersão em relação a linha de tendência. Penman Modificado e Radiação superestimaram a ETo para valores acima de 4 mm d⁻¹, ocorrendo comportamento contrário para valores menores. O método de Blaney-Criddle apresentou subestimativa da evapotranspiração de referência em todas escalas. Dentre os métodos observados, o de Priestley-Taylor e Turc foram os que apresentaram menor dispersão dos dados em torno da linha de tendência, sendo que a esta dispersão acompanhou a reta de valores 1:1, porém, superestimaram a evapotranspiração em todas as escalas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que:

Para as condições climáticas médias da localidade de Piatã/BA, os métodos de estimativa da ETo que apresentaram os melhores resultados em relação ao método padrão Penman-Monteith – FAO 56 foram Blaney-Criddle, Radiação FAO 24, Penman Modificado FAO 24, Priestley-Taylor, Turc e Hargreaves-Samani.

Para as condições climáticas médias da localidade de Anagé/BA, os métodos de estimativa da ETo diária que apresentaram os melhores resultados em relação ao método padrão Penman-Monteith – FAO 56 foram Blaney-Criddle, Radiação - FAO 24, Penman Modificado - FAO 24, Hargreaves-Samani, Turc e Priestley-Taylor. Para as outras escalas de tempo os métodos foram Blaney-Criddle, Penman Modificado - FAO 24, Radiação - FAO 24, Turc, Hargreaves-Samani, e Priestley-Taylor.

Para as condições climáticas médias da localidade de Ilhéus/BA, os métodos de estimativa da ETo que apresentaram os melhores resultados em relação ao método padrão Penman-Monteith – FAO 56 foram Penman Modificado - FAO 24, Radiação - FAO 24, Blaney-Criddle, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani.

Para as três localidades estudadas, os melhores métodos foram Blaney-Criddle, Penman Modificado - FAO 24, Radiação FAO 24, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.112, n.4, p.348-386, 1986.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, New York, v.81, p.650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.117, n.5, p.758-772, 1991.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: Reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625p.

BRAGANÇA, R.; Estudo comparativo da estimativa da Evapotranspiração de Referência para três localidades no estado do Espírito Santo. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)-UFES, Alegre, 2007.

BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, T.L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M. E. **Design operation of farm irrigation system**. St. Joseph: ASAE, p.189-232, 1983.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CONCEIÇÃO, M.A.F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.2, p.229-236, 2003.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

EVANGELISTA, A.W.P. **Avaliação de métodos de determinação da evapotranspiração, no interior de casa de vegetação, em Lavras-MG**. Lavras, MG: 1999. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

HENRIQUE, F. de A.N.; DANTAS, R.T. Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande, Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11 n.6, p.594-599, 2007.

IBGE – Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>; acesso em 10/08/2008.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332p.

MANDELLI, F.; CONCEIÇÃO, M.A.F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.2, p.303-307, 2005.

MENDONÇA, J.C.; SOUZA, E.F. de; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183p.

PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Engenharia Rural**, Piracicaba, SP, n.1, v.6, p.65-75, 1995.

SANTIAGO, A. U. Evapotranspiração de referencia medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal. Dissertação (Mestrado em agrometeorologia)-USP, Piracicaba, 2001.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

TAGLIAFERRE, C. Desempenho do irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência. Viçosa, 2006. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-UFV.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n.C5. p.8995-9005, 1985.