UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FABRÍCIO ALVES PINTO

MEDIÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUES CLASSE A INSTALADOS EM AMBIENTES AQUÁTICO E TERRESTRE

Fortaleza - Ceará
2009

FABRÍCIO ALVES PINTO

MEDIÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUES CLASSE A INSTALADOS EM AMBIENTES AQUÁTICO E TERRESTRE

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semi-árido.

Orientador: Professor Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Ph.D. - UFC.

Fortaleza - Ceará
2009

P726m Pinto, Fabrício Alves
Medição da evaporação em tanques classe A instalados em ambiente s aquático e terrestre/ Fabrício Alves Pinto, 2009.
58 f. ; il. color. enc.

Orientador: Prof. PhD. Renato Silvio da Frota Ribeiro
Área de concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no semi-árido.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2009.

1. Radiação solar 2.Evaporação - meteorologia 3. Rádio freqüência I. Ribeiro, Renato Silvio da Frota (orienta.) II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola III. Título

CDD **630**

FABRÍCIO ALVES PINTO

MEDIÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM TANQUES CLASSE A INSTALADOS EM AMBIENTES AQUÁTICO E TERRESTRE

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em 10 de fevereiro de 2009

BANCA EXAMINADORA

Prof° Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof° Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana
Universidade Federal do Ceará – UFC

Dr. Almiro Tavares Medeiros
Universidade Federal do Ceará – UFC

À minha família

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder forças para enfrentar todos os obstáculos de mais uma caminhada.

A minha família pelo apoio incondicional.

Ao professor Renato Sílvio da Frota Ribeiro pelo incentivo, paciência, compreensão, companheirismo e preciosa orientação.

Aos demais professores e professoras do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, por estarem sempre dispostos a ajudar.

Aos colegas de curso, que pela convivência durante a realização deste trabalho tornaram-se meus amigos.

A todos da Estação de Piscicultura do Centro de Ciências Agrárias em especial ao professor José Wilson Calíope de Freitas.

A Universidade Federal do Ceará, através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Fundo Setorial dos Recursos Hídricos (CT-Hidro), pelo financiamento do projeto.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram da realização deste trabalho.

RESUMO

As condições climáticas das regiões semi-áridas favorecem a evaporação que representa a maior perda do volume líquido dos açudes, portanto, um parâmetro importante para o gerenciamento dos recursos hídricos. Um dos instrumentos mais difundidos e utilizados para estimar a evaporação em reservatórios é o Tanque Classe A. Assim, este trabalho teve como objetivo principal comparar a evaporação medida em dois tanques Classe A, sendo um instalado em ambiente aquático e outro em ambiente terrestre, e como objetivo secundário avaliar estimativas da evaporação obtidas pelos métodos propostos por Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) em relação às medidas de evaporação obtidas nos referidos tanques evaporimétricos. O experimento foi conduzido na Estação de Piscicultura do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, CE. Neste local, além dos tanques Classe A, foi instalada uma estação meteorológica automática. No período de fevereiro a novembro de 2008 foram realizadas medidas diárias de evaporação e coletados, semanalmente, os dados meteorológicos armazenados no sistema de aquisição da estação, utilizando rádio freqüência. O total evaporado no tanque Classe A instalado em ambiente terrestre foi 5,3% superior ao total evaporado no tanque Classe A em ambiente aquático. A instalação do tanque Classe A em ambiente aquático reduziu os efeitos diretos da radiação solar incidente, umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento sobre a evaporação assim com a amplitude térmica da água no seu interior. O método proposto por Penman (1948) apresentou os melhores desempenhos, com erros relativos de -3,0% em relação ao tanque Classe A no ambiente aquático e -7,9% em relação ao tanque Classe A no ambiente terrestre.

Palavras-chave: Evaporação, tanque Classe A, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, rádio freqüência.

ABSTRACT

The main objective of this research was to compare evaporation measured in two Class A evaporation pans. The first one installed 15 cm over the surface and the second one installed at surface level in a small reservoir. The experiment was carried out at the Fisheries Station of the Federal University of Ceará, in Fortaleza. An automated weather station was installed at the same site. During February to November of 2008, evaporation data were measured in a daily basis. The weather data were collected in a weekly basis using a radio frequency system. The evaporation measured at a soil surface was 5.3% higher than the evaporation measured at a water surface level of the reservoir. The different installation conditions were influenced differently by the weather parameters. The evaporation estimation methods of Penman, Linsley and Linacre underestimated the evaporation measured in the reservoir, and the Penman method presented the smaller error.

Key-words: evaporation, class A pan, solar radiation, relative humidity, wind speed, radio frequency.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Tanque Classe A..... 19
FIGURA 02 – Localização do açude Bom Princípio em Guaiúba – CE..... 21
FIGURA 03 – Localização do açude Santo Anastácio em Fortaleza – CE..... 22
FIGURA 04 – Localização da área experimental..... 22
FIGURA 05 – Estrados de madeira com 15 cm e 60 cm de altura apoiando os tanques Classe A..... 23
FIGURA 06 – Tanque Classe A no solo sobre estrado de madeira (ambiente terrestre)..... 24
FIGURA 07 – Tanque Classe A imerso no viveiro de peixes (ambiente aquático)..... 24
FIGURA 08 – Estação meteorológica automática..... 26
FIGURA 09 – Saldo radiômetro posicionado sobre a superfície líquida do tanque Classe A..... 26
FIGURA 10 – Termopar tipo T (cobre-constantan) usado para medir a temperatura da água no interior dos tanques Classe A..... 27
FIGURA 11 – Antena e módulo transceptor do sistema de rádio freqüência..... 27
FIGURA 12 – Evaporação diária medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 33
FIGURA 13 – Precipitações observadas de fevereiro a novembro de 2008..... 34
FIGURA 14 – Relação entre a radiação solar incidente e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 35
FIGURA 15 – Relação entre a radiação solar incidente e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 36
FIGURA 16 – Relação entre a umidade relativa e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 36
FIGURA 17 – Relação entre a umidade relativa e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 37
FIGURA 18 – Relação entre a temperatura do ar e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 37
FIGURA 19 – Relação entre a temperatura do ar e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 38

FIGURA 20 – Relação entre a velocidade do vento e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 38
FIGURA 21 – Relação entre a velocidade do vento e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 39
FIGURA 22 – Radiação solar incidente e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 40
FIGURA 23 – Umidade relativa e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 41
FIGURA 24 – Velocidade do vento e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 41
FIGURA 25 – Temperatura do ar e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 42
FIGURA 26 – Temperatura média diária da água no interior dos tanques Classe A nos ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 43
FIGURA 27 – Temperaturas máximas e mínimas da água no interior dos tanques Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 43
FIGURA 28 – Relação entre valores da temperatura do ar e da água no interior do tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 44
FIGURA 29 – Relação entre valores da temperatura do ar e da água no interior do tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 44
FIGURA 30 – Temperatura média horária do ar e da água no interior do tanque Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante 24 horas do dia..... 45
FIGURA 31 – Relação entre valores de evaporação medidos nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)..... 46

FIGURA 32 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Penman (1948), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 48
FIGURA 33 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Linsley (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 49
FIGURA 34 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Linacre (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 49
FIGURA 35 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Penman (1948), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 50
FIGURA 36 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Linsley (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 50
FIGURA 37 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Linacre (1993), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 51
FIGURA 38 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Penman (1948) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 51
FIGURA 39 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linsley (1982) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 52
FIGURA 40 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linacre (1993) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA)..... 52
FIGURA 41 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Penman (1948) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 53
FIGURA 42 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linsley (1982) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 53

FIGURA 43 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linacre (1993) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT)..... 54

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Coeficiente de passagem açude / tanque (média anual)..... 18

TABELA 02 – Critérios para interpretação do índice (c)..... 32

TABELA 03 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas nos tanques Classe A (TCAA) e (TCAT) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 34

TABELA 04 – Dados climáticos registrados na Estação de Piscicultura para os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 40

TABELA 05 – Totais mensais de evaporação (mm) medidas nos Tanques Classe A, em 245 dias de fevereiro a novembro de 2008..... 46

TABELA 06 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas no tanque Classe A (TCAA) e estimadas através dos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 47

TABELA 07 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas no tanque Classe A (TCAT) e estimadas através dos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008..... 48

TABELA 08 Desempenho dos métodos de estimativa da evaporação, de acordo com o índice de desempenho “c”, em relação às medidas dos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)..... 54

TABELA 09 Totais mensais de evaporação (mm) medidos nos tanques Classe A e estimados através dos métodos de Panman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) no períodos de fevereiro a novembro de 2008..... 55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 14
2. REVISÃO DE LITERATURA..... 15
2.1 Evaporação..... 15
2.2 Estimativas da evaporação..... 15
2.3 Modelos empíricos..... 16
2.4 Tanques evaporimétricos..... 17
2.5 Tanque Classe A 19
3. MATERIAL E MÉTODOS..... 21
3.1 Local..... 21
3.2 Tanques Classe A..... 23
3.3 Estação meteorológica automática..... 25
3.4 Estimativas da evaporação..... 28
3.5 Análises realizadas..... 31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 33
4.1 Evaporação medida nos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)..... 33
4.2. Influências meteorológicas na evaporação dos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)..... 35
4.3. Comportamento térmico do tanque Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAB)..... 42
4.4. Coeficiente de passagem entre o tanque Classe A instalado em ambiente terrestre (TCAT) e o tanque Classe A instalado em ambiente aquático (TCAA)..... 45
4.5. Avaliação dos métodos de estimativa da evaporação..... 47
5. CONCLUSÕES..... 56
REFERÊNCIAS..... 57

1. INTRODUÇÃO

O novo paradigma em relação aos recursos hídricos, recentemente construído no Brasil, trata a água como um recurso escasso e limitado, dotado de valor econômico, necessitando de regulamentação dos direitos de uso e de informações técnico-científicas que resultem na sua racionalização.

No semi-árido nordestino a escassez desse recurso não é uma preocupação recente, desde o período imperial foram realizados esforços para a construção de açudes. Hoje o nordeste brasileiro é a segunda região mais "açudada" do mundo, só perdendo para a Índia. No Ceará estão distribuídos 7.227 açudes, com um potencial de acumulação de cerca de 17 bilhões de metros cúbicos de água.

Os reservatórios de superfície, principalmente os de pequeno porte na região semi-árida, sofrem elevadas perdas por evaporação e infiltração. Essas perdas podem ser estimadas em 3.000 mm anuais, e as perdas apenas por evaporação, no semi-árido, podem alcançar 2.500 mm ao longo de um ano. Por esse motivo, estudos que busquem avaliar as perdas por evaporação são essenciais para o uso racional dos recursos hídricos nessas regiões.

Em termos práticos, estimativas da evaporação para lagos, represas ou açudes vem sendo realizadas pela aplicação de coeficientes às medidas de evaporação em tanques ou através de equações baseadas em informações climatológicas.

Dentre os tanques evaporimétricos, o Classe A, desenvolvido nos Estados Unidos, é de uso generalizado, inclusive no Brasil. No entanto, devido seu volume relativamente pequeno sua constituição metálica e sua forma de exposição, é considerado não representativo das condições naturais de lagos ou açudes.

A utilização de equações para estimativa da evaporação requer na maioria das vezes o conhecimento de variáveis climáticas como radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar sobre a superfície evaporante, porém é comum o uso de informações oriundas de estações climatológicas situadas no ambiente terrestre e muitas vezes distantes do reservatório em questão, portanto consideradas não representativas.

Diante dessa realidade o presente trabalho teve por objetivo principal comparar a evaporação medida em dois tanques Classe A, sendo um instalado em ambiente aquático e outro em ambiente terrestre e como objetivo secundário avaliar o desempenho de métodos de estimativa propostos por Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) em relação aos valores medidos nestes tanques.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evaporação

A evaporação definida como fenômeno físico é a passagem do estado líquido para o gasoso. No caso da água, essa passagem requer um suprimento de energia equivalente a 2,45 $MJ.m^{-2}$.

Muito da moderna compreensão da evaporação vem do trabalho do cientista inglês John Dalton (1766-1844). Dalton usou instrumentos que ele mesmo construiu e mediu valores diários de pressão barométrica, temperatura, condições do vento, umidade e índice pluviométrico. Estas observações o levaram a pensar na composição do ar e no comportamento dos gases chegando à conclusão que deveria haver algum outro processo funcionando, alguma coisa que se movesse de modo lento e contínuo e que seus instrumentos não estavam medindo, havia sido descoberto a evaporação (WILIAMS, 2001).

Em Meteorologia o termo evaporação é usado para designar a transferência de água para a atmosfera, sob a forma de vapor, decorrente da evaporação que se verifica no solo úmido sem vegetação, nos oceanos, lagos, rios ou em outras superfícies hídricas naturais (VAREJÃO, 2006).

2.2 Estimativas da evaporação

Estimativas da evaporação da água em lagos e represas podem ser feitas pela utilização de modelos fundamentados em balanço de energia, balanço de água, modelos aerodinâmicos e combinados. São comuns formulações empíricas e ou semi-empíricas, não só para determinar os diferentes coeficientes para os modelos teóricos, como também para a obtenção indireta de determinados termos (parametrização) dos modelos evaporimétricos para lagos (PEREIRA et al., 1997).

A estimativa da evaporação pode ser feita através da medição direta, indireta e fórmulas empíricas. Dentre os vários métodos utilizados para determinar a evaporação de uma superfície podem ser citados: transferência de massa, balanço hídrico, balanço de energia, equação de Penman (combinação de métodos) e evaporímetros (PAPA, 2002).

Varejão (2006) considerara que estimativas da evaporação e da evapotranspiração possam ser realizadas por processos empíricos, baseados apenas em observações da realidade física, ou por processos indiretos, classificados conforme a fundamentação teórica em que se apóiam:

- Método aerodinâmico, baseado na hipótese de que a transferência turbulenta de massa, de calor e de quantidade de movimento é semelhante à difusão molecular;

- Método do balanço energético, que se fundamenta na aplicação do princípio da conservação de energia aos fluxos de energia relacionados com a superfície-fonte;

- Métodos combinados, envolvem considerações teóricas decorrentes dos métodos anteriores;

- Método das flutuações, fundamentado na oscilação de parâmetros microclimáticos em torno das respectivas médias;

2.3 Modelos empíricos

Dalton (1802) declarou que a evaporação é proporcional a diferença da pressão de vapor entre a superfície da água e o ar, e que a velocidade do vento afeta essa proporcionalidade.

Penman (1948) utilizando princípios físicos corretos propôs um modelo teórico-empírico para a estimativa da evaporação em grandes superfícies de água, o modelo combina dois termos: um energético, com base no conhecimento da energia líquida disponível na superfície e outro aerodinâmico, baseado no conhecimento da velocidade média do vento e do déficit de saturação de vapor do ar.

Linacre (1977) apresentou uma simplificação do método de Penman para a estimativa da evaporação média mensal de uma área bem suprida de umidade, o método apresentado requer apenas valores de temperatura média do ar e das coordenadas geográficas do local.

Linsley et al. (1982) após a realização de um experimento e de uma extensiva revisão física e matemática, propôs equações para estimar a evaporação de lagos. As equações foram testadas nos Estados Unidos e os resultados obtidos foram considerados bons para o lago Hefner (1.000 ha), contudo inadequados para o lago Mead (64.000 ha).

Linacre (1993) propôs uma nova simplificação da equação de Penman para a estimativa da evaporação em lagos quando os dados de precipitação e de velocidade do vento fossem também conhecidos.

2.4 Tanques evaporimétricos

Sleight (1917) em Denver, Colorado, comparou tanques enterrados a 0,90m de profundidade com diferentes diâmetros e chegou à conclusão que a evaporação observada no tanque com 3,60m de diâmetro seria a mesma de um lago com 720 ha de superfície.

Young (1947), na Califórnia, comparou medidas do tanque Classe A com o tanque de referência de 3,6m de diâmetro e o lago Elsinore (1.290 ha) e encontrou para os dois casos fator de conversão igual a 0,77.

Houman (1973) verificou o uso de diferentes coeficientes de tanque para o Classe A com objetivo de estimar a evaporação em vários lagos dos Estados Unidos, sendo que os valores variavam de 0,60 em regiões áridas a 0,80 em regiões úmidas. Estas variações ocorriam em função do local e da época do ano, impedindo o uso de um valor constante na estimativa da evaporação em lagos.

Molle (1989) estudando seis açudes com capacidades avaliadas entre 800.000 e 2.000.000 de m^3 no nordeste brasileiro, considerou as perdas por infiltração desprezíveis e relacionou o rebaixamento do espelho com a evaporação medida no tanque Classe A, encontrando o coeficiente de passagem açude / tanque (Tabela 1).

As medidas de evaporação de tanque servem de base para técnicas que estimam a evaporação e a evapotranspiração de superfícies naturais. As medidas efetuadas em tanques de evaporação são vantajosas porque, em muitos casos, o resultado do impacto das variáveis meteorológicas, e os dados de tanque são disponíveis imediatamente para qualquer período. Contudo, embora os tanques instalados acima da superfície sejam econômicos e de fácil instalação e manutenção, a quantidade de água evaporada é maior do que nos tanques enterrados, principalmente por causa da energia radiante adicional absorvida pelas laterais. Com o tanque enterrado os efeitos da radiação sobre suas paredes, bem como, as trocas de calor com a atmosfera tendem a reduzir. As desvantagens dos tanques enterrados é que, além dos custos, há dificuldades de limpeza, bem como, dificuldade de detectar vazamento no mesmo. Já os tanques flutuantes são influenciados pelo próprio lago, além dos respingos reproduzirem dados poucos confiáveis, os custos de instalação e operação, bem como, chuva e vento muito fortes podem invalidar as medidas. Portanto, necessariamente não são bons indicadores da evaporação de lagos (WMO, 1996 *apud* OLIVEIRA, 2003).

Jacobs et al. (1998), estudando o comportamento térmico de tanques Classe A, observaram que quando a temperatura da água excede consideravelmente a temperatura do ar, a taxa de evaporação do tanque aumenta rapidamente, resultando numa grande sobrestimativa da evaporação. Estes autores também observaram que no período noturno, devido a temperatura da água estar mais aquecida que a temperatura do ar, o tanque continua a evaporar.

TABELA 1 – Coeficiente de passagem açude / tanque (média anual).

Açude	Numero de meses observados	Coeficiente (açude / tanque)
Urucu (Sumé, PB)	33	0,94
Jatobá (Sumé, PB)	52	0,87
Juá (Tauá, CE)	34	0,95
Moquem (Tauá, CE)	55	0,85
J.Fragoso (Tauá, CE)	46	0,97
Conceição (Riacho do Navio, PE)	32	0,86

Fonte: Molle (1989).

Segundo Roque e Sansigolo (2001), os coeficientes aplicados ao tanque Classe A para estimativa da evaporação de lagos em algumas localidades dos EUA são: 0,81 no lago Okeechobee (Flórida), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm; 0,70 no lago Heffner (Oklahoma), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 800 mm; e 0,52 no lago Salton (Califórnia), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 60 mm. Essas variações mostram que os lagos criam seus próprios ambientes, que diferem do terrestre, sobretudo quando o clima é árido.

Bezerra et al. (2002), avaliando o aquecimento da água em tanques de cimento amianto e Classe A, concluíram que: durante o período de maior incidência de radiação solar, independentemente da constituição do tanque evaporimétrico (metal ou amianto), se estes operam com a mesma lâmina, o aquecimento da massa de água é praticamente igual; durante o período em que a atuação dos raios solares é pequena ou nula, o tanque de cimento conserva por mais tempo a energia absorvida; no período do dia em que ocorrerem as menores temperaturas o tanque Classe A apresenta resfriamento acentuado. Diante disso, os autores recomendam que o uso medidas de evaporação do tanque Classe A para estimar a evaporação de lagos, açudes, barragens e represas, deva ser feito de forma criteriosa.

Oliveira (2003) ao realizar estudos em duas áreas, uma próxima ao açude Epitácio Pessoa (cidade de Boqueirão, PB) e outra próxima ao açude Jatobá (cidade de Patos, PB), considerou a evaporação medida em tanques enterrados de 5 m de diâmetro (Tanque Padrão) como representativa dos açudes e concluiu que o uso do coeficiente 0,7 como fator de correção da evaporação do tanque Classe A para estimar a evaporação de açudes, resulta em subestimativas, e que estes erros podem ser ainda maiores em períodos frios e úmidos.

Oliveira (2003) mediu a temperatura da água no interior de dois tanques Classe A e de dois açudes, chegando à conclusão que embora a água no interior do tanque Classe A apresente temperatura média diária bem próxima da temperatura média diária da água do açude a amplitude térmica no interior do tanque é bastante elevada. As diferenças de temperatura ocorrem ao longo do dia, principalmente nos instantes mais quentes do período diurno, alcançando temperaturas de até 7°C acima da temperatura da água do açude, e no período noturno, mais frio até 6°C. Isso mostra que a média nesse caso mascara o comportamento térmico e seus efeitos. Pois, enquanto a água do açude no período noturno permanece aquecida e conseqüentemente evaporando, a água do tanque Classe A encontra-se fria, portanto, sem condições de evaporar.

2.5 Tanque Classe A

De acordo com Allen (1998) o tanque Classe A possui forma circular com diâmetro = 120,7 cm e profundidade = 25,0 cm. Deve ser construído com ferro galvanizado e pintado com tinta aluminizada.

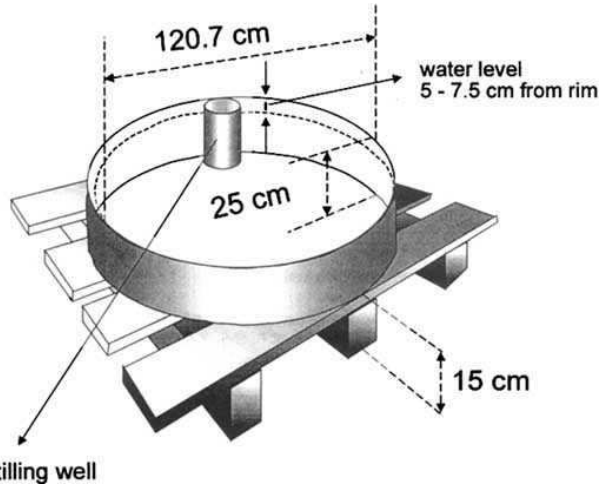

FIGURA 1 – Tanque Classe A
Fonte: Allen (1998).

O tanque Classe A deve ser instalado sobre estrado de madeira ficando a 15 cm acima do solo. O nível da água no seu interior deve ser mantido entre 5 e 7,5 cm da borda e a sua leitura deve ser realizada no interior do poço tranqüilizador através de um parafuso micrométrico. A evaporação é dada pela diferença entre duas leituras consecutivas, comumente diárias.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

Para a instalação do experimento foram inicialmente avaliados dois açudes: o Bom Princípio (Figura 2) e o Santo Anastácio (Figura 3), localizados nos municípios de Guaiúba e Fortaleza, respectivamente. Esta avaliação permitiu a escolha da área experimental e a decisão de não se instalar o tanque Classe A dentro de um açude.

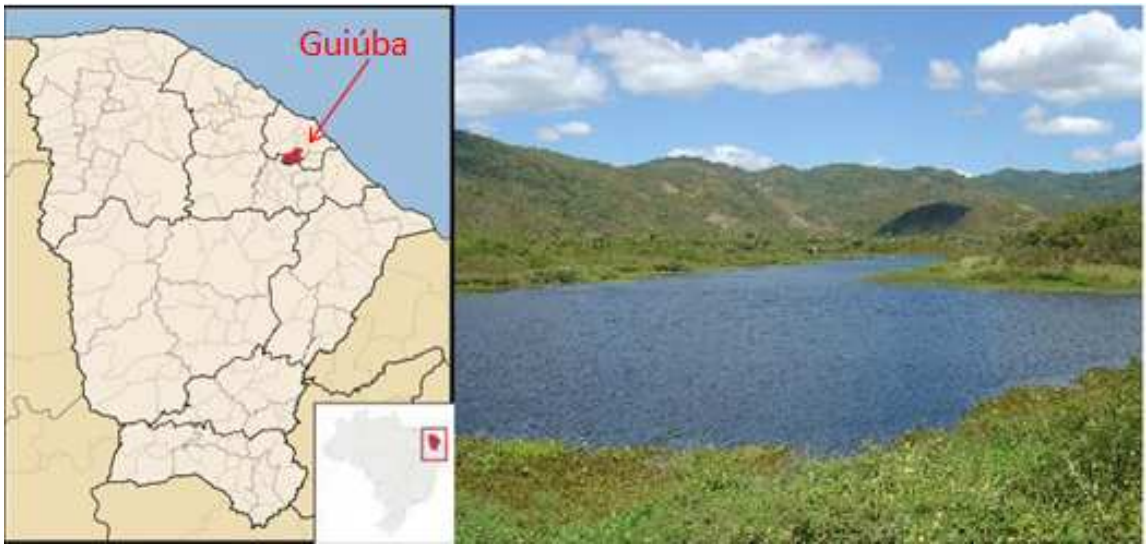

FIGURA 2 – Localização do açude Bom Princípio em Guaiúba – CE.

Em conseqüência, o experimento foi conduzido no entorno do açude Santo Anastácio nas dependências da Estação de Piscicultura do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizada no Município de Fortaleza – CE. A área experimental encontrava-se a jusante do açude nas coordenadas geográficas 03º 44’ de latitude Sul e 38º 34’ de longitude Oeste a uma altitude de 12m (Figura 4).

O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Aw’, ou seja, tropical chuvoso, muito quente, com predomínio de chuvas nas estações do verão e do outono. De acordo com a classificação de Thornthwaite, o clima local é do tipo C2WA’a: clima sub-úmido a úmido, muito quente, com período chuvoso nas estações do verão e do outono, com moderada deficiência hídrica nas estações do inverno e primavera e com pequenas diferenças no total mensal da evapotranspiração ao longo do ano.

FIGURA 3 – Localização do açude Santo Anastácio em Fortaleza – CE.

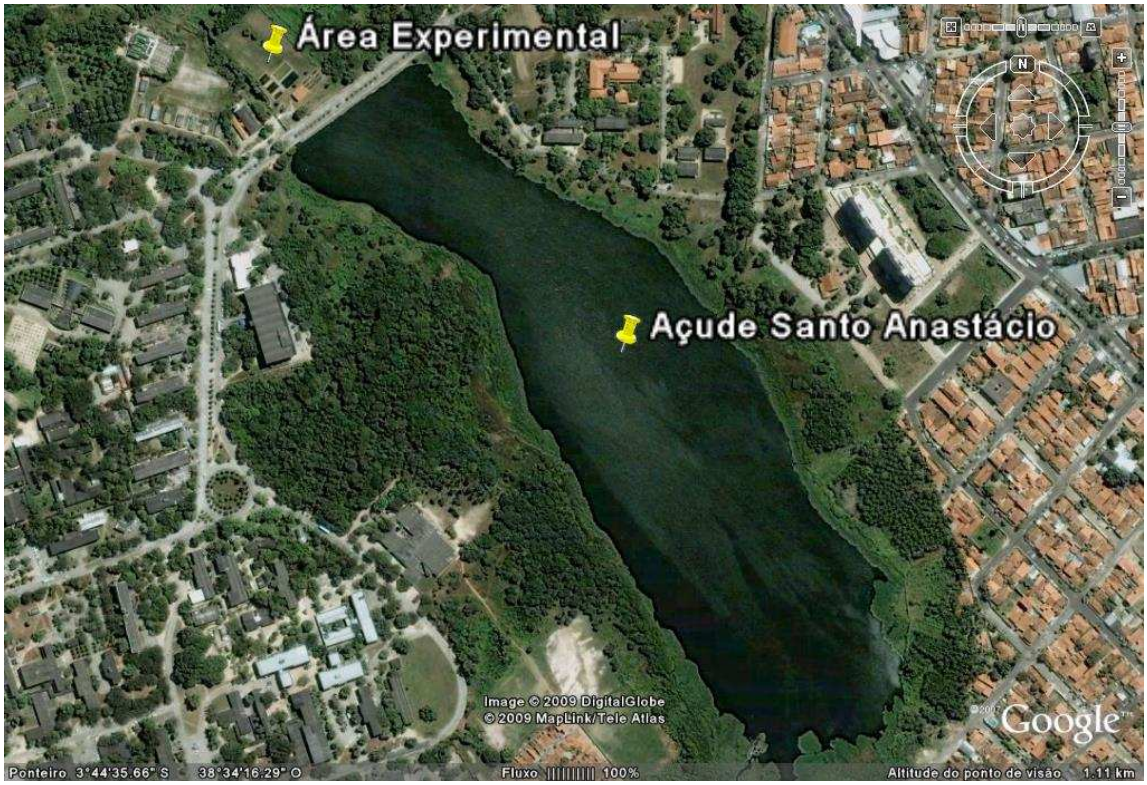

FIGURA 4 – Localização da área experimental (Fonte: Google Earth, 2008).

A região apresenta médias anuais de precipitação, temperatura, umidade relativa e evapotranspiração potencial de: 1.523 mm, 26,9º C, 69% e 1.747 mm, respectivamente. Dados fornecidos pela estação climatológica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará com base no período 1971 a 2000.

3.2 Tanques Classe A

Os tanques Classe A utilizados no estudo foram confeccionados em chapa de aço inoxidável obedecendo às dimensões especificadas por seus idealizadores: 120,7 cm de diâmetro e 25,0 cm de profundidade.

Um dos tanques Classe A foi instalado no solo (ambiente terrestre) sobre estrado de madeira com 15 cm de altura e o outro imerso em um viveiro de peixes (ambiente aquático) apoiado no estrado de madeira com 60 cm de altura (Figuras 5, 6 e 7).

FIGURA 5 – Estrados de madeira com 15 cm e 60 cm de altura apoiando os tanques Classe A.

O viveiro de peixes tinha as dimensões de 20 m de comprimento, 10 m de largura e 1, 1 m de profundidade média. O nível da água no seu interior ficava em torno de 8 cm abaixo da borda do tanque Classe A.

Quando se fazia necessário o manejo dos peixes do viveiro, o tanque Classe A era transferido para o viveiro que ficava ao lado e que apresentava as mesmas dimensões.

FIGURA 6 – Tanque Classe A no solo sobre estrado de madeira (ambiente terrestre).

FIGURA 7 – Tanque Classe A imerso no viveiro de peixes (ambiente aquático).

As leituras do nível da água nos tanques Classe A foram realizadas diariamente às 09:00h. A água no interior dos tanques era trocada em intervalos variáveis conforme a necessidade de limpeza ou mudança de local (no caso do Classe A instalado no viveiro).

3.3 Estação meteorológica automática

Uma estação automática da marca Campbell Scientific[1] (Figura 8) foi instalada ao lado dos tanques Classe A. As variáveis meteorológicas observadas foram as seguintes:

- Radiação solar incidente, medida a 3,0 m acima do solo, com um piranômetro modelo CS300;

- Temperatura do ar e umidade relativa, medidas a 2,0 m acima do solo, com um termohigrômetro modelo CS215;

- Velocidade e direção do vento, medidas a 3,0 m acima do solo, por meio de um anemômetro/anemoscópio modelo 03001;

- Saldo de radiação, medido a 0,15 m acima da superfície líquida do tanque Classe A (Figura 9), por meio de um saldo radiômetro modelo NR-LITE (dynamic wind speed correction);

- Precipitação, medida por meio de um pluviômetro modelo TB4 Rain Gate, instalado 1,5 m acima do solo.

A temperatura da água no interior dos dois tanques Classe A foi medida com o uso de termopares do tipo T (Figura 10).

Os valores medidos pelos sensores foram armazenados em um sistema de aquisição de dados, modelo CR 10X que foi programado para realizar leituras a cada 10s e calcular médias a cada uma hora e a cada um dia.

Os dados armazenados foram coletados semanalmente através de um sistema de rádio freqüência, modelo RF400 (Figura 11) que permitia a conexão entre um microcomputador, distante 300 m da área experimental, e o sistema da aquisição de dados.

[1]As marcas são colocadas aqui apenas para informação dos leitores, não representando nenhuma forma de indicação pelos autores ou pela Universidade Federal do Ceará.

FIGURA 8 – Estação meteorológica automática.

FIGURA 9 – Saldo radiômetro posicionado sobre a superfície líquida do tanque Classe A.

FIGURA 10 – Termopar tipo T (cobre-constantan) usado para medir a temperatura da água no interior dos tanques Classe A.

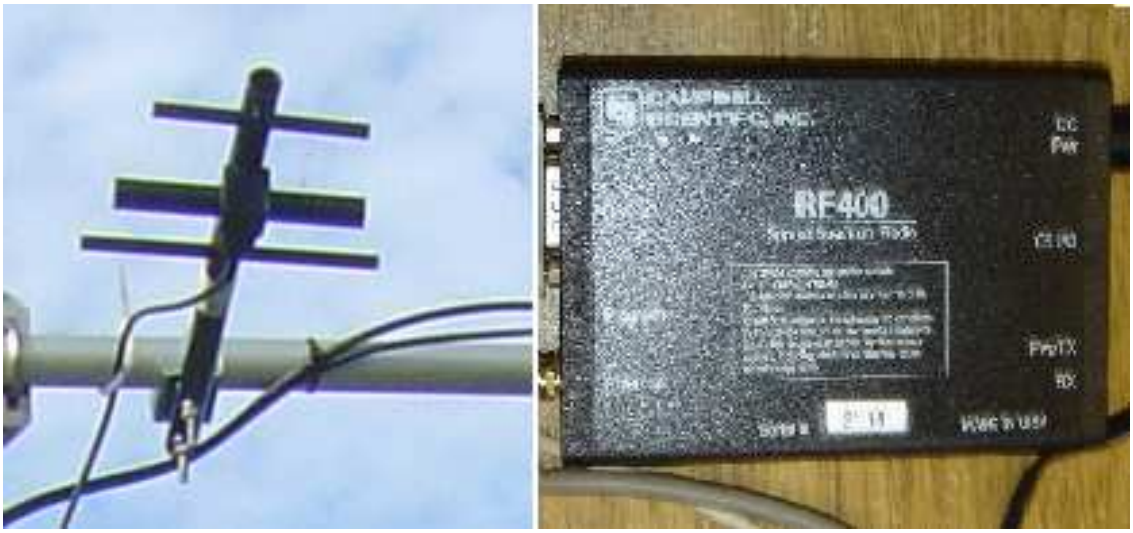

FIGURA 11 – Antena e módulo transceptor do sistema de rádio freqüência.

3.4 Estimativas da evaporação

As variáveis meteorológicas medidas pela estação automática foram utilizadas para estimar a evaporação de acordo com os métodos e procedimentos apresentados abaixo:

1. Penman (1948), modificado por Tubelis (1992):

$$E_P = \frac{(\frac{\Delta}{\gamma} \cdot Rn) + Ea}{(\frac{\Delta}{\gamma} + 1) \cdot 59} \quad (1)$$

Onde:

E_P = evaporação potencial (mm.dia^{-1});

Δ/γ = coeficiente dependente da temperatura do ar;

R_n = saldo de radiação (cal.cm^{-2}.dia^{-1});

E_a = poder evaporante do ar (cal.cm-^{2}.dia^{-1}), dado pela Equação 2.

$$Ea = 20{,}65 \cdot (k + \frac{u_2}{160}) \cdot (e_s - e) \quad (2)$$

Onde:

k = fator de rugosidade da superfície (água ≅ 0,5);

u_2 = vento percorrido a 2 m da superfície (km.dia^{-1});

e_s = tensão de saturação de vapor d'água na temperatura do ar (mmHg);

e = tensão de vapor d'água do ar (mmHg).

Tubelis (1992), sugere um valor tabelado para o coeficiente Δ/γ, porém para que os cálculos fossem realizados em planilhas do Microsoft Excel os valores de Δ e γ foram calculados conforme as Equações 3 e 4, propostas por Cuenca (1989).

$$\Delta = 2(0{,}00738 t_{média} + 0{,}8072)^7 - 0{,}00116 \quad (3)$$

Onde:

$t_{média}$ = temperatura média do ar para o período (ºC).

$$\gamma = 1{,}6134\frac{P}{L} \tag{4}$$

Onde:

P = 1013 – 0,1015(z) sendo, z a altitude do local (m);

L = 2500,78 – 2,3601t sendo, t a temperatura do ar (°C).

Para a determinação dos valores da tensão de saturação do vapor d'água na temperatura do ar (e_s) utilizou-se a Equação 5, expressa por MURRAY(1967).

$$e_s = 5{,}58\exp\left[\frac{17{,}27t}{237{,}3+t}\right] \tag{5}$$

Onde:

t = temperatura do ar (°C).

A Equação 6 foi empregada para o cálculo da tensão de vapor d'água do ar (e).

$$e = e_s\frac{UR}{100} \tag{6}$$

Onde:

e_s = tensão de saturação de vapor d'água na temperatura do ar (mmHg);

UR = umidade relativa do ar (%).

2. Linsley et al (1982):

$$E_L = 0{,}122(e_o - e_2)u_4 \qquad (7)$$

Onde:

E_L = evaporação do lago (mm.dia^{-1});

e_0 = tensão de vapor d'água correspondente à temperatura da superfície da água (mb);

e_2 = tensão de vapor d'água do ar 2 m acima da superfície da água (mb);

u_4 = velocidade do vento medida 4 m acima da superfície do lago (m.s^{-1}).

Por não se dispor da temperatura na superfície da água os valores da tensão de vapor d'água correspondente à temperatura da superfície da água (e_o) foram substituídos por valores da tensão de saturação de vapor d'água do ar, Linsley et al (1982) afirmaram que essa substituição seria aplicável em alguns casos.

Como o anemômetro da estação automática estava posicionado 2 m acima do solo utilizou-se para estimar os valores de velocidade do vento 4 m acima da superfície do lago (u_4) a Equação 8 (VIANA e AZEVEDO, 2008).

$$\frac{V_4}{V_2} = \left(\frac{Z_4}{Z_2}\right)^{0,143} \qquad (8)$$

Onde:

V_2 = velocidade do vento a 2m da superfície do lago (m.s^{-1});

V_4 = velocidade do vento a 4m da superfície do lago (m.s^{-1});

Z_2 = altura inferior (2 m);

Z_4 = altura superior (4 m).

3. Linacre (1993):

$$E_L = (0{,}015 + 0{,}00042t_{média} + 10^{-6}z)[0{,}8R_s - 40 + 2{,}5F.u(T - T_d)] \qquad (9)$$

Onde:

E_L = evaporação do lago (mm.dia^{-1});
t = temperatura média do ar (ºC), média dos valores extremos diários;
z = altitude do local (m);
R_S = radiação solar na superfície do lago (W.m^{-2});
F = 1,0 – 8,7 x 10^{-5}z, fator de correção devido a altitude do local;
u_2 = vel. média do vento medida 2 m acima da superfície do lago (m.s^{-1});
T_d = temperatura do ponto de orvalho (ºC).

Linacre (1993) sugere dois métodos para o cálculo de Rs entretanto, para esta variável foram utilizados os valores medidos pelo piranômetro da estação automática.

Para a estimativa da temperatura do ponto de orvalho (Td) foi utilizada a Equação 10.

$$T_d = \frac{237{,}3 * \log\left(\frac{e_a}{4{,}58}\right)}{7{,}5 - \log\left(\frac{e_a}{4{,}58}\right)} \qquad (10)$$

Onde:

To = temperatura do ponto de orvalho (°C);
e_a = pressão atual do vapor (mmHg).

3.5 Análises realizadas

As medidas de evaporação obtidas nos dois tanques Classe A, foram comparadas estatisticamente através de análises de variância e testes de Tukey;

Foram aplicadas análises de regressão linear simples para avaliar correlações entre:

- As variáveis meteorológicas (radiação solar incidente, umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento) e as medidas de evaporação nos tanques Classe A;
- A temperatura do ar e a temperatura da água no interior dos tanques Classe A;
- As medidas de evaporação do tanque Classe A instalado no ambiente terrestre e do tanque Classe A instalado no ambiente aquático;
- As estimativas de evaporação e as medidas de evaporação nos tanques Classe A;

Para comparar estatisticamente os valores medidos e estimados de evaporação, foram realizadas análises de variância e testes de Tukey. Os métodos de estimativa da evaporação tiveram seus desempenhos avaliados em relação aos tanques Classe A, tomando-se por base os indicadores propostos por Camargo e Sentelhas (1997) definidos da seguinte forma: precisão - coeficiente de correlação (r), exatidão - índice de Wilmott (id) e de confiança ou desempenho (c).

O índice de Wilmott (id) foi calculado através da seguinte equação:

$$id = 1 - \frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum \left[\left(Pi - \bar{O} \right) + \left(Oi - \bar{O} \right) \right]} \qquad (11)$$

Onde:

P_i = valor estimado;

O_i = valor observado;

O = média dos valores observados.

O índice de confiança ou desempenho (c) foi calculado conforme a Equação 12 e os seus valores interpretados de acordo com a Tabela 2.

$$c = r * id \qquad (12)$$

TABELA 2 – Critérios para interpretação do índice (c).

Valor de "c"	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evaporação medida nos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)

Durante os meses de fevereiro a novembro de 2008 foram realizadas 245 medidas diárias da evaporação nos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT).

A Figura 12 mostra as curvas evaporação nos tanques (TCAA) e (TCAT). Como pode se observar a evaporação apresentou comportamento semelhante nos dois tanques.

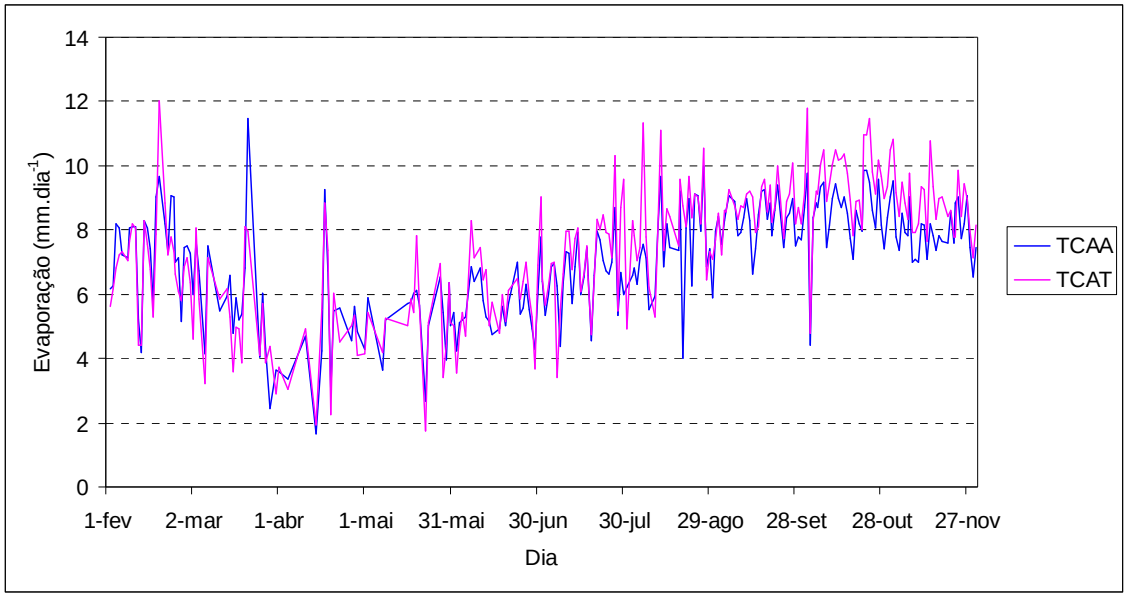

FIGURA 12 – Evaporação diária medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

A Tabela 3 mostra o comparativo estatístico entre os valores da evaporação medida nos tanques (TCAA) e (TCAT). Durante os meses de fevereiro a junho não se verificam diferenças estatísticas, neste período ocorreram precipitações mais intensas o que certamente concorreu para a redução da evaporação nos dois tanques (Figura 13). Durante os meses de agosto a novembro as medidas de evaporação do tanque instalado em ambiente terrestre (TCAT) superaram as medidas do tanque instalado em ambiente aquático (TCAA). As menores evaporações ocorreram no mês de abril e as maiores no mês de outubro. Aquino (1986) realizando estudos com tanque Classe A, também no estado do Ceará, verificou que as menores evaporações ocorriam no mês de março e as maiores nos meses de outubro e novembro.

TABELA 3 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas nos tanques Classe A (TCAA) e (TCAT) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

Ano 2008	ECAA	ECAT
Fevereiro	7,41a	7,09a
Março	5,86a	5,35a
Abril	4,81a	4,81a
Maio	5,21a	5,12a
Junho	5,53a	5,83a
Julho	6,61a	7,10a
Agosto	7,46b	8,23a
Setembro	8,31b	8,75a
Outubro	8,55b	9,55a
Novembro	7,91b	8,76a
Período	7,03b	7,40a

Médias seguidas por letras iguais, dentro da mesma linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância.

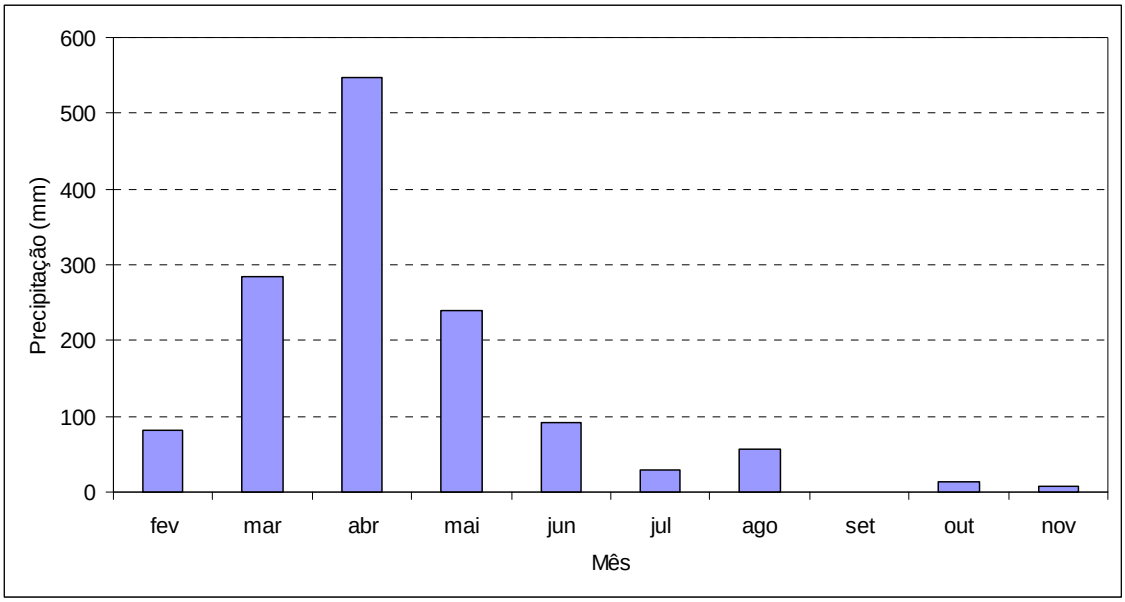

FIGURA 13 – Precipitações observadas de fevereiro a novembro de 2008.

4.2. Influências meteorológicas na evaporação dos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)

A distância entre os tanques Classe A instalados em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT) era de 20 m. Por esta razão, considerou–se que os dois tanques estavam sob as mesmas influencias meteorológicas.

As Figuras 14 a 21 mostram os resultados da análise de regressão linear utilizadas para avaliar os efeitos diretos da radiação solar (RS), umidade relativa (UR), temperatura do ar (T_{ar}) e velocidade do vento (U) sobre a evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT).

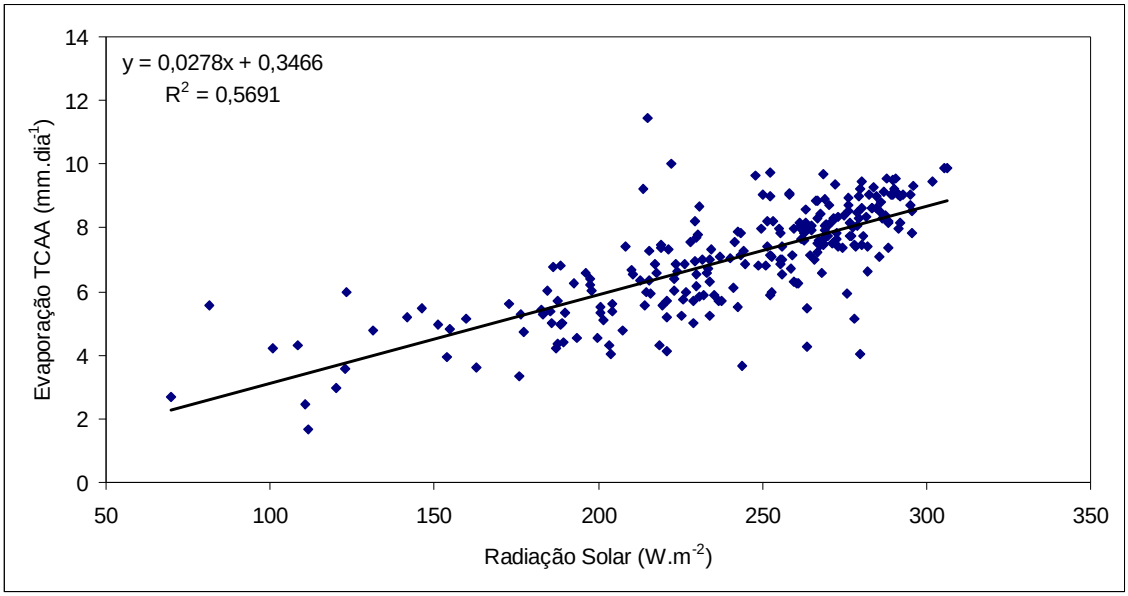

FIGURA 14 – Relação entre a radiação solar incidente e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

Para o tanque em ambiente aquático (TCAA), a radiação solar (RS) e a velocidade do vento (U) foram as variáveis que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2= 0,57) e (R^2= 0,56), respectivamente. Isso demonstrou que estes fatores exerceram os maiores efeitos diretos na evaporação com o tanque Classe A em ambiente aquático (Figuras 14 e 20).

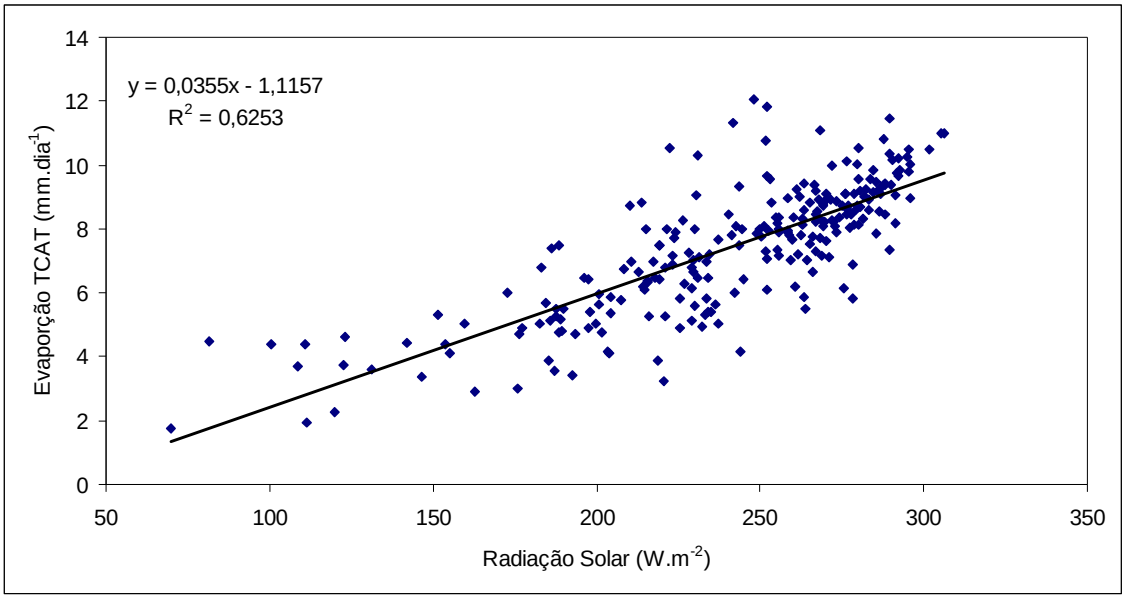

FIGURA 15 – Relação entre a radiação solar incidente e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

Para o tanque em ambiente terrestre (TCAT), a velocidade do vento (U) foi a variável que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2= 0,67). Isso demonstrou que este fator foi o que exerceu o maior efeito direto na evaporação com o tanque Classe A em ambiente terrestre (Figura 21).

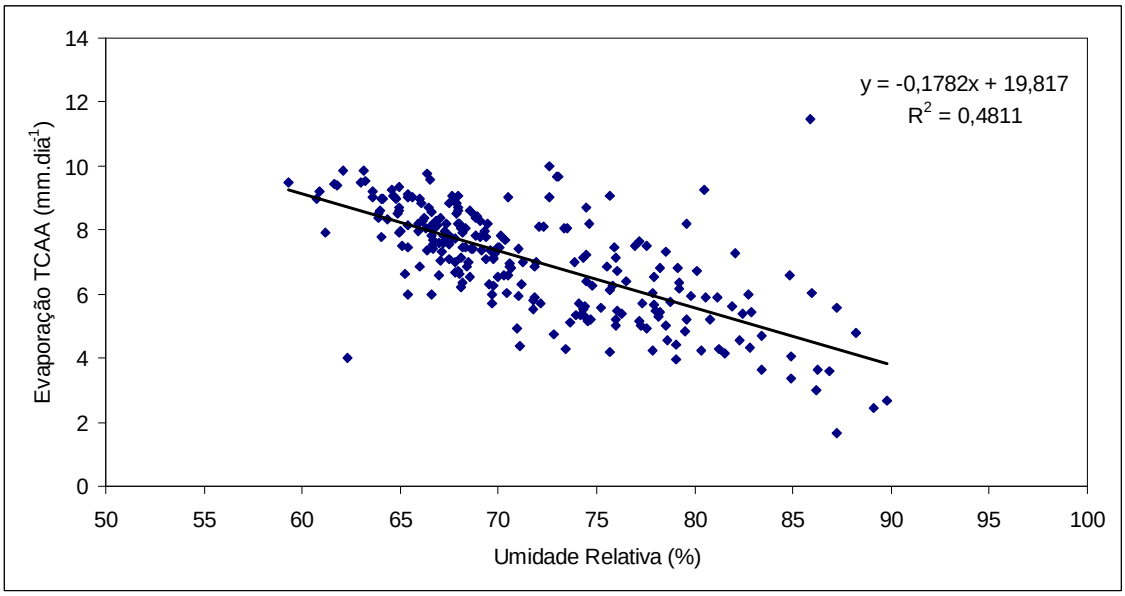

FIGURA 16 – Relação entre a umidade relativa e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

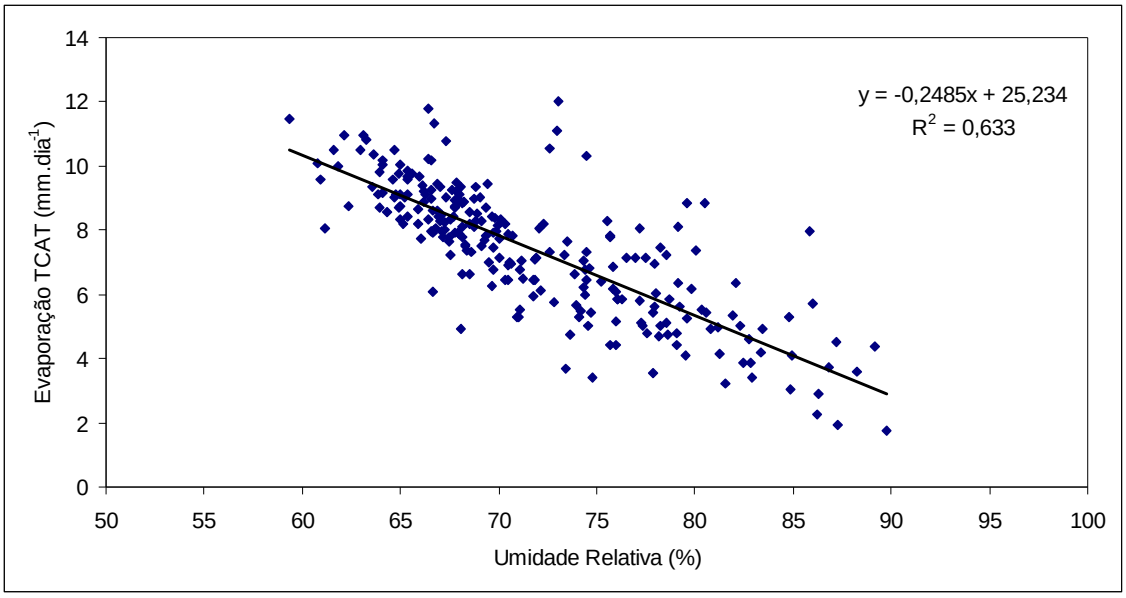

FIGURA 17 – Relação entre a umidade relativa e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

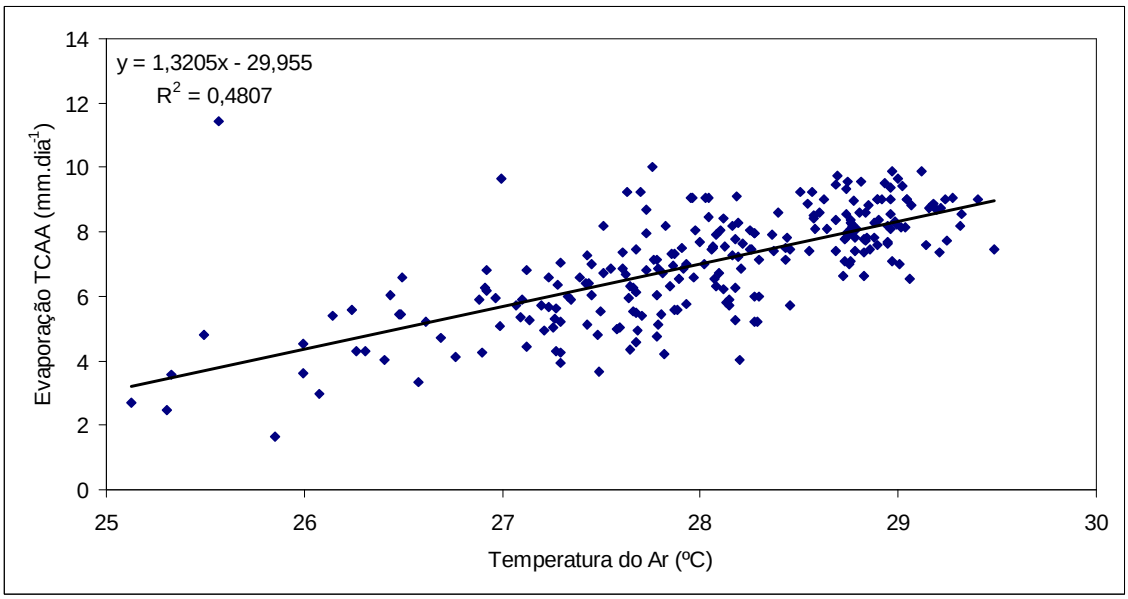

FIGURA 18 – Relação entre a temperatura do ar e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

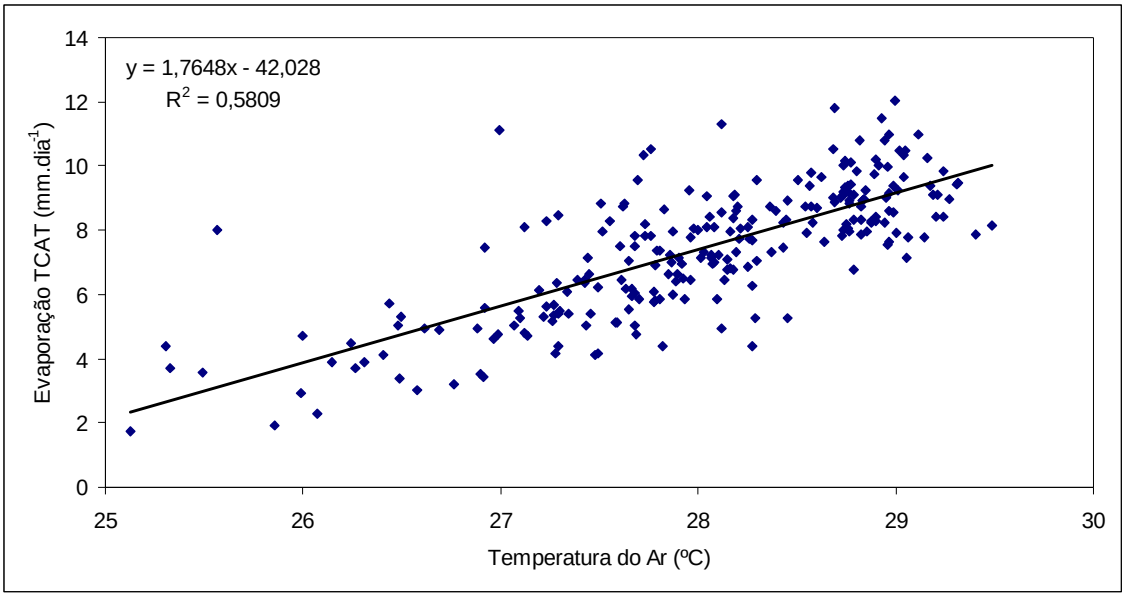

FIGURA 19 – Relação entre a temperatura do ar e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

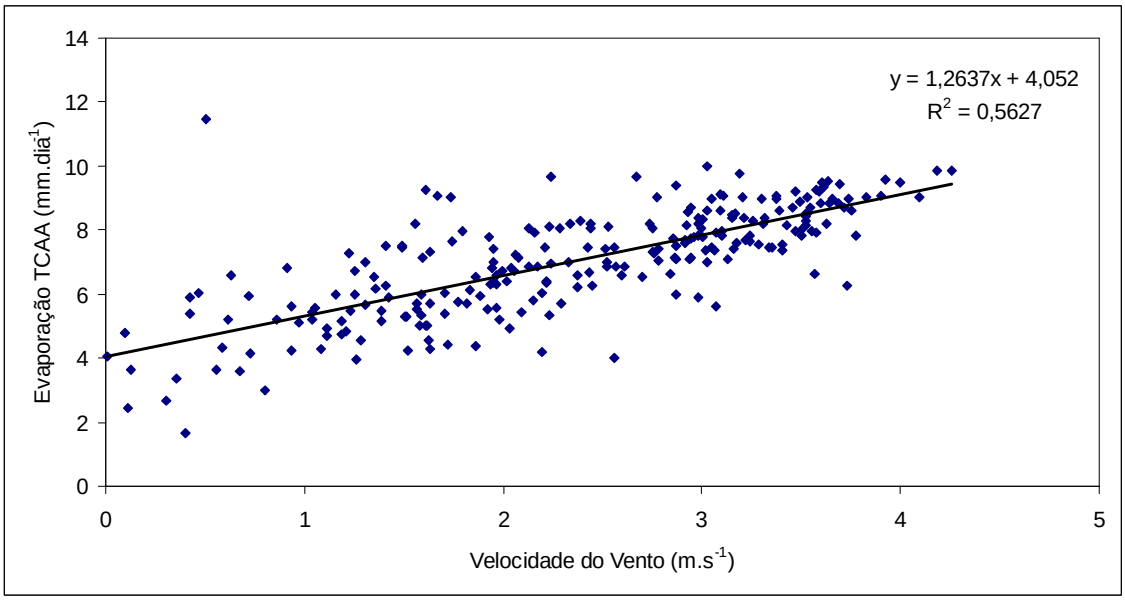

FIGURA 20 – Relação entre a velocidade do vento e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

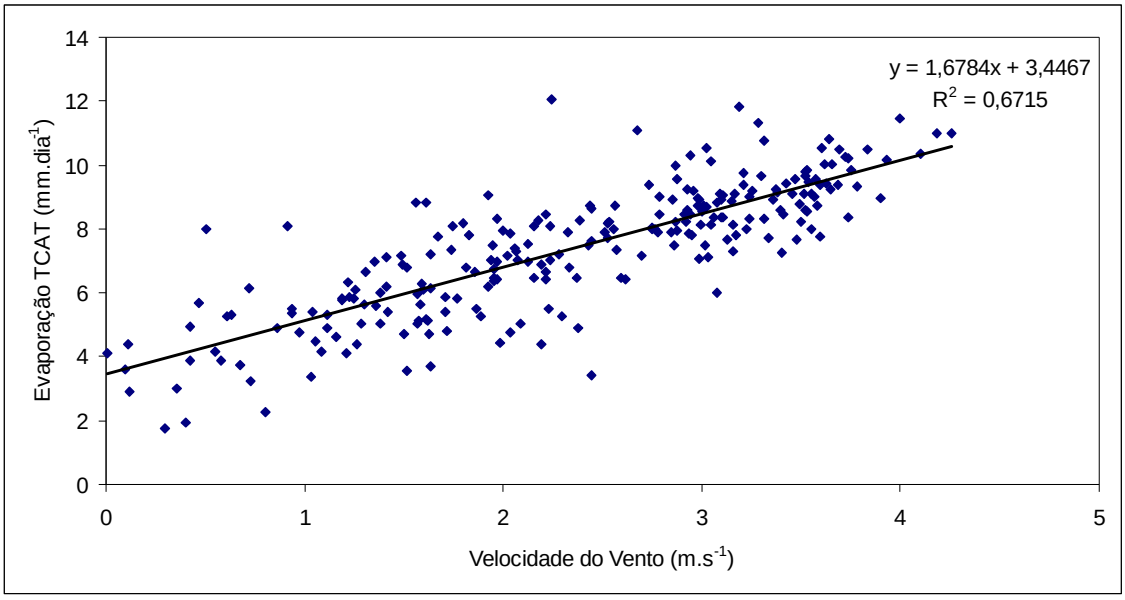

FIGURA 21 – Relação entre a velocidade do vento e a evaporação medida no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

Quando comparados os dois tanques Classe A (TCAA) e (TCAT), as quatro variáveis meteorológicas apresentaram os menores coeficientes de determinação para o tanque em ambiente aquático (TCAA), demonstrando que estes fatores exerceram menores efeitos diretos sobre a evaporação no ambiente aquático.

Os fatores radiação solar, umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento não apresentaram uma forte correlação parcial com a evaporação. Papa (2002) comenta que os fatores climáticos, a natureza da superfície evaporante entre outros fatores influenciam a evaporação, contudo uma análise quantitativa precisa da relação efetiva de cada um é difícil devido às suas inter-relações e interdependências.

A Tabela 4 apresenta os dados meteorológicos registrados durante o período de estudo. Em seguida as Figuras 22 a 25 mostram os gráficos da radiação solar incidente, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura do ar, emparelhados com as curvas de evaporação medidas nos tanques (TCAT) e (TCAA). Nestas, observa-se que as variáveis meteorológicas apresentam relações diretas (radiação solar incidente e velocidade) e inversas (umidade relativa) com as evaporações medidas nos tanques Classe A tanto em ambiente aquático (TCAA) como terrestre (TCAT). Observa-se também que durante os meses de agosto a novembro, período em que as medidas de evaporação nos dois tanques apresentaram diferenças estatísticas entre si (TABELA 3), ocorreram simultaneamente valores mínimos de umidade relativa e máximos de radiação solar incidente e velocidade do vento.

TABELA 4 – Dados climáticos registrados na Estação de Piscicultura durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

Ano	RS ($W.m^{-2}$)	UR (%)	T_{ar} (ºC)	U_2 ($m.s^{-1}$)
Fev	242,92	74,60	28,17	1,94
Mar	194,41	83,08	26,55	0,68
Abr	162,48	84,46	26,52	0,99
Mai	186,17	81,18	27,02	1,23
Jun	199,19	74,22	27,39	1,73
Jul	220,34	69,63	27,75	2,35
Ago	256,61	68,60	27,85	2,74
Set	273,56	66,17	28,57	3,24
Out	281,39	66,03	28,80	3,48
Nov	267,00	67,65	29,00	3,12

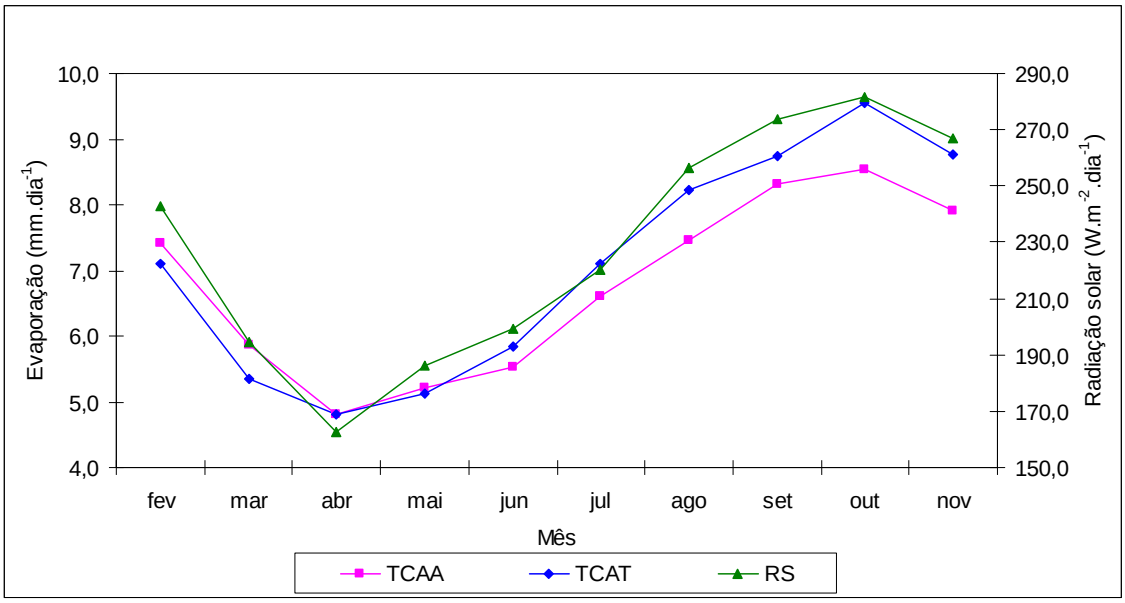

FIGURA 22 – Radiação solar incidente e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

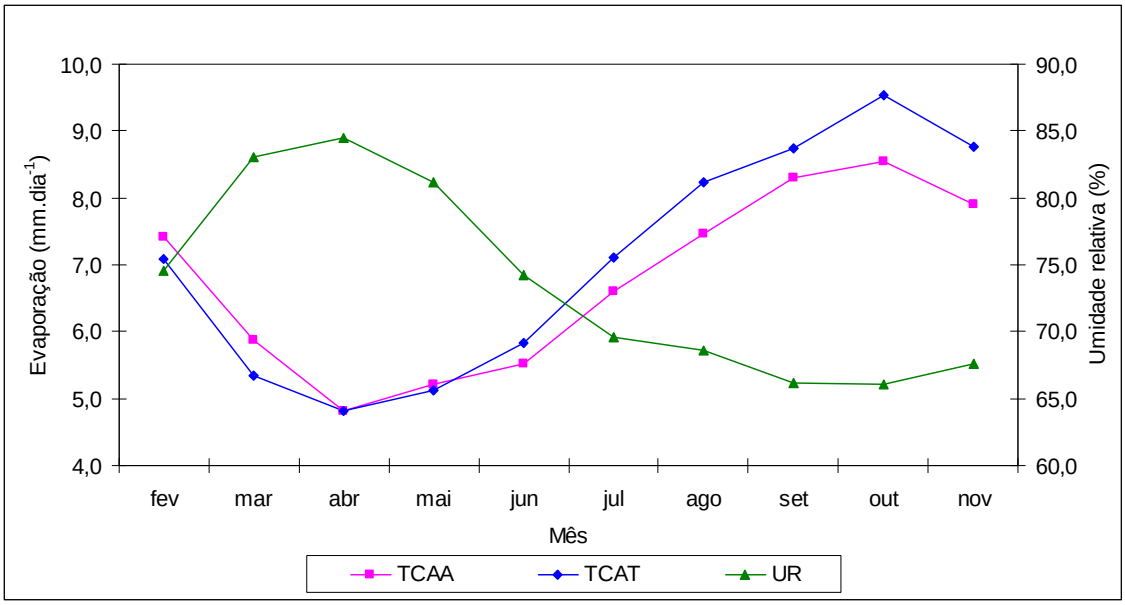

FIGURA 23 – Umidade relativa e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

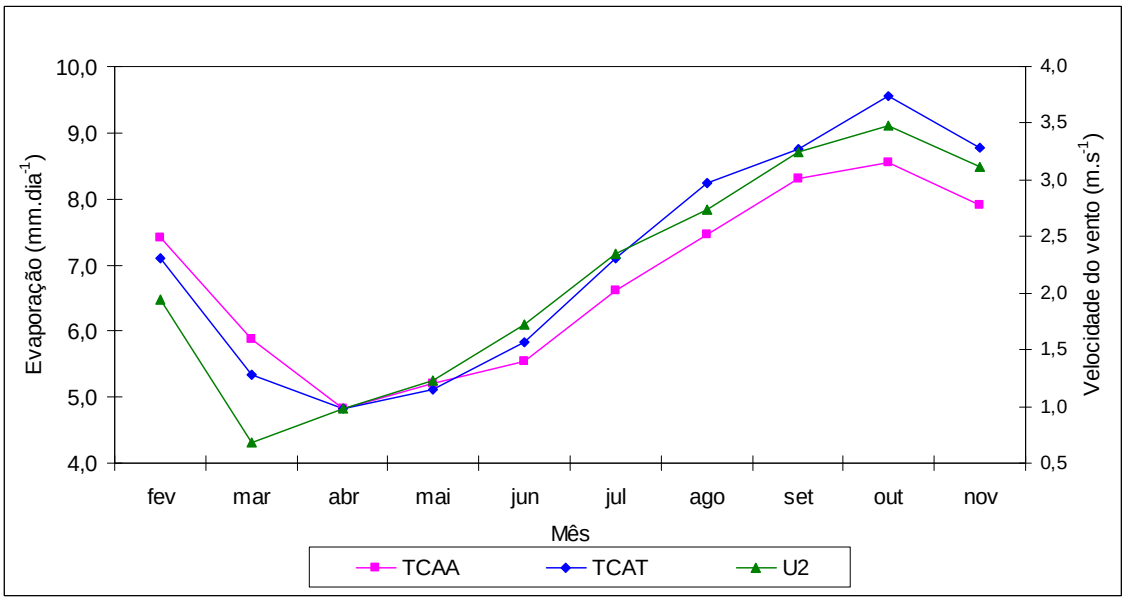

FIGURA 24 – Velocidade do vento e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

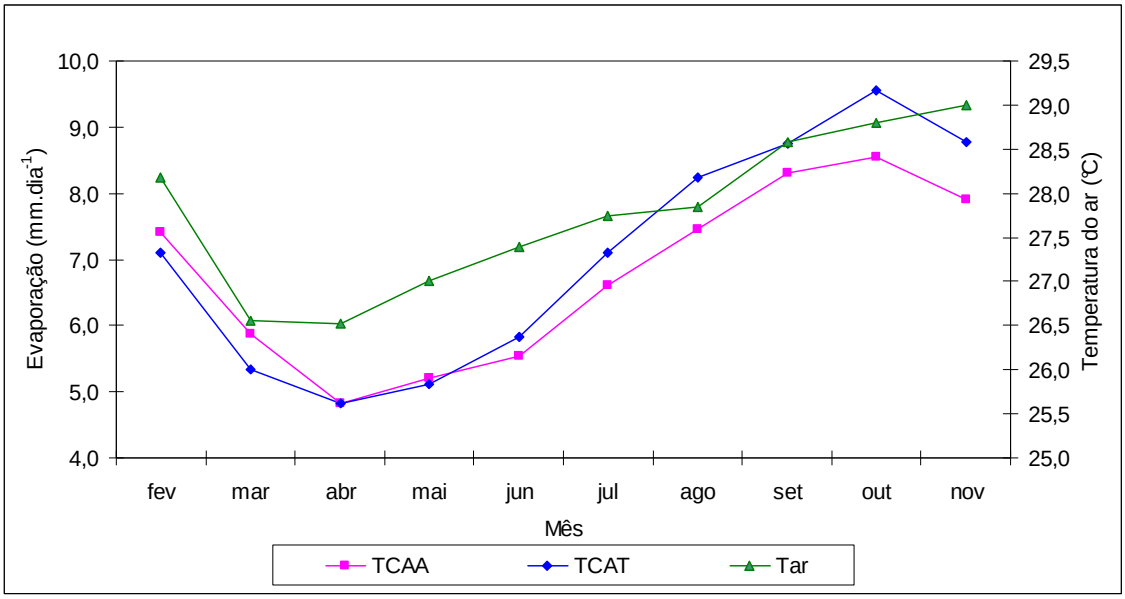

FIGURA 25 – Temperatura do ar e evaporação medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

4.3. Comportamento térmico do tanque Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT)

A Figura 26 mostra as curvas da temperatura média diária da água no interior dos tanques Classe A nos ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT) durante o período de estudo. Como pode ser observado (TCAA) apresentou valores superiores ao do tanque (TCAT).

Em intervalos diários os tanques (TCAA) e (TCAT) apresentam amplitudes térmicas diferentes (Figura 27). Isso esclarece porque não foi possível estabelecer uma relação entre os valores de evaporação medidos nos tanques e a temperatura média da água no seu interior.

Foram realizadas análises de regressão linear com dados horários da temperatura do ar e da água no interior dos tanques (Figuras 28 e 29). Os coeficientes de determinação encontrados foram (R^2= 0,08) e (R^2= 0,45) para os tanques (TCAA) e (TCAT), respectivamente. Estes coeficientes mostram que a temperatura da água no interior do tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) recebeu maior influência da temperatura do ar, o que também pode ser observado na Figura 30.

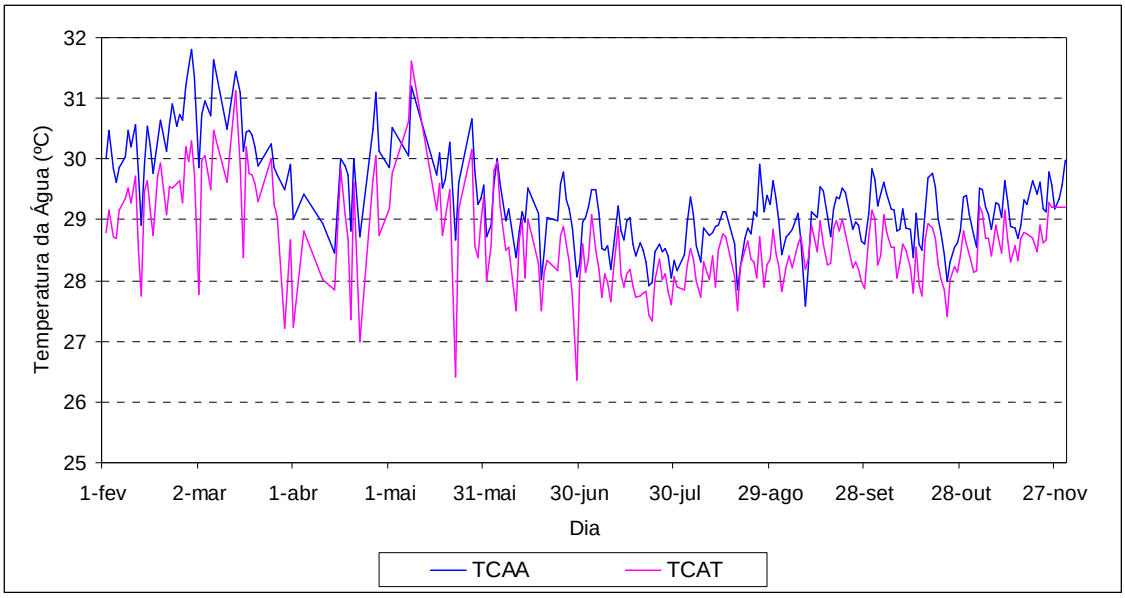

FIGURA 26 – Temperatura média diária da água no interior dos tanques Classe A nos ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

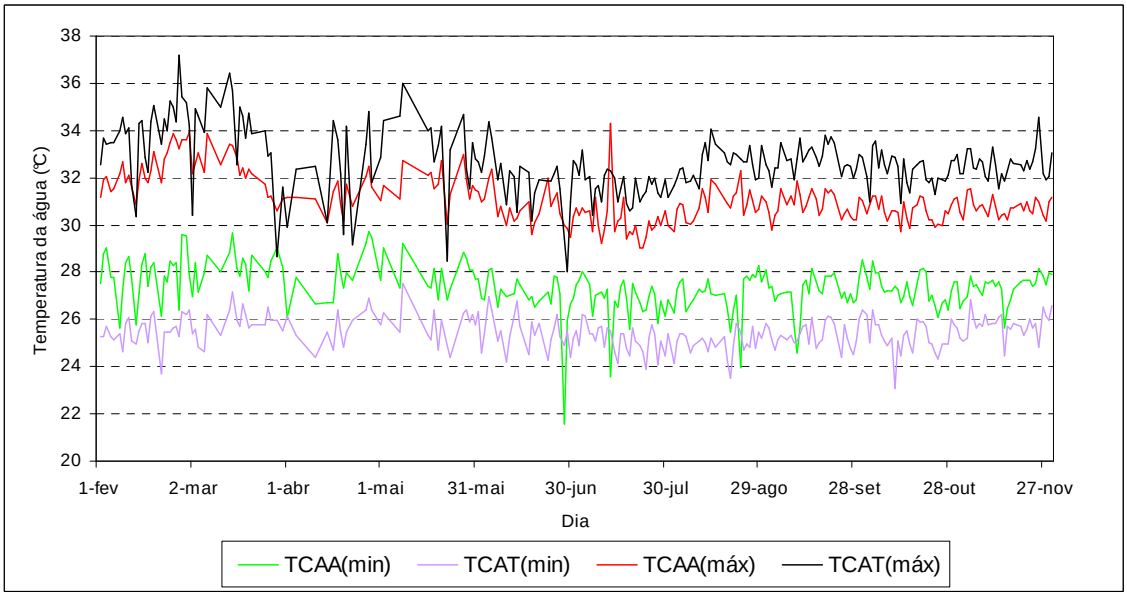

FIGURA 27 – Temperaturas máximas e mínimas da água no interior dos tanques Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

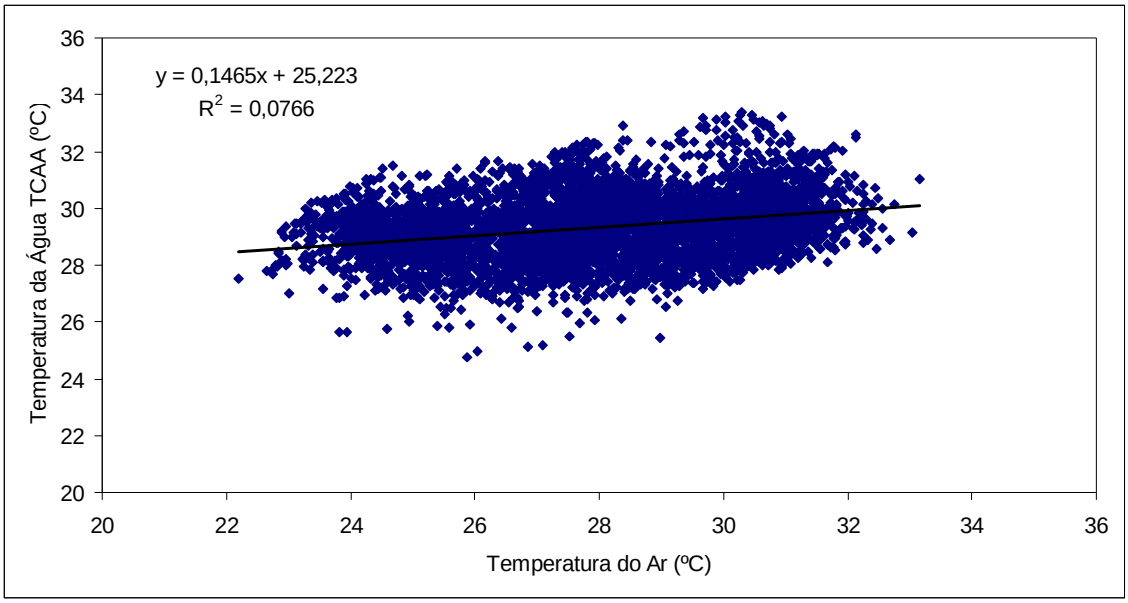

FIGURA 28 – Relação entre valores da temperatura do ar e da água no interior do tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

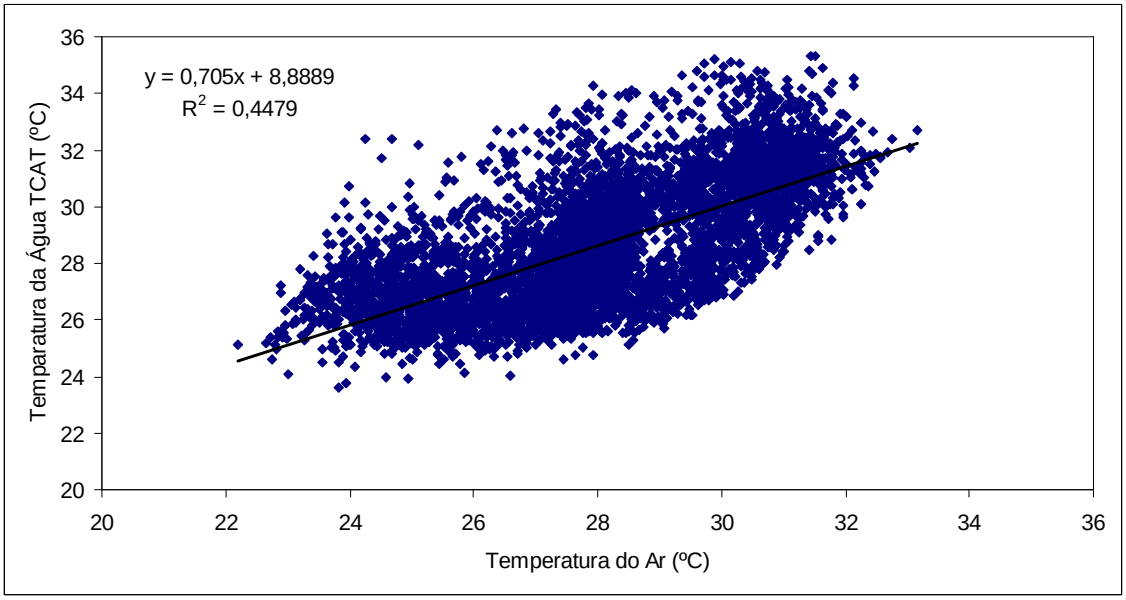

FIGURA 29 – Relação entre valores da temperatura do ar e da água no interior do tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

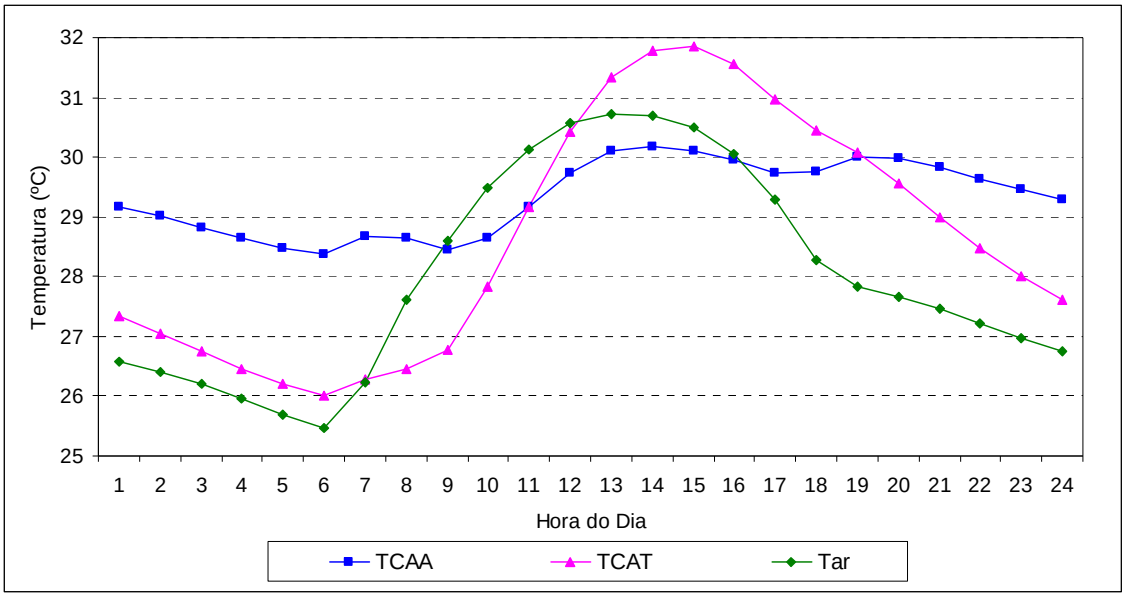

FIGURA 30 – Temperatura média horária do ar e da água no interior do tanque Classe A nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT), durante 24 horas do dia.

A temperatura da água no interior do tanque (TCAT) apresentou comportamento similar à temperatura do ar (Tar) e conseqüentemente maior amplitude térmica, o mesmo não ocorreu com a água no interior do tanque (TCAA). Com base nos estudos realizados por Oliveira (2003), é possível afirmar que o tanque instalado em ambiente aquático foi capaz de descrever termicamente o que aconteceria em um açude. Neste mesmo estudo, o autor conclui que a temperatura média diária da água no interior do tanque Classe A instalado em ambiente terrestre mascara o comportamento térmico e seus efeitos.

4.4. Coeficiente de passagem entre o tanque Classe A instalado em ambiente terrestre (TCAT) e o tanque Classe A instalado em ambiente aquático (TCAA)

A Figura 31 mostra o resultado da análise de regressão linear realizada com valores diários da evaporação medidos nos tanques Classe A nos ambientes terrestre (TCAT) e aquático (TCCA). A equação determinada por esse método (Y=0,9345x) estima a evaporação no tanque (TCAA) em função de valores observados no tanque (TCAT).

Os valores de evaporação medidos no tanque (TCAT) foram maiores em relação aos do tanque (TCAA) em 5,5%, 7,4%, 10,3%, 5,3%, 11,7%, 10,7% e 5,3% nos meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, respectivamente. Foram inferiores em 4,3% no mês de fevereiro, 8,8% no mês de março e 1,7% no mês de maio. Durante todo o período de medição (fevereiro a novembro) os valores de evaporação do tanque (TCAT) foram superiores aos do tanque (TCAA) em 5,3% (Tabela 5).

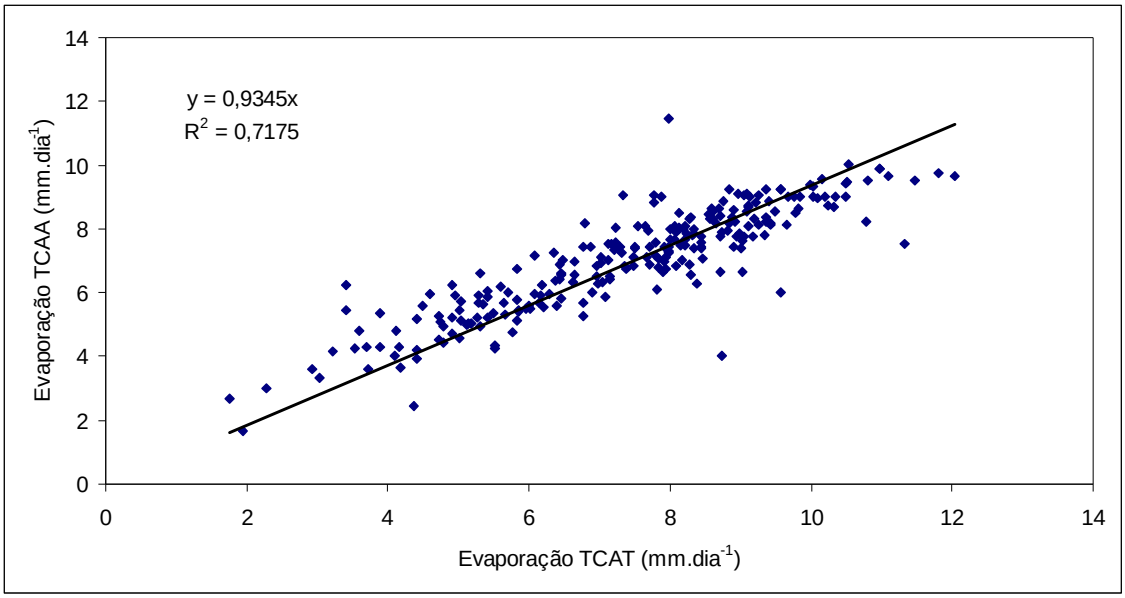

FIGURA 31 – Relação entre valores de evaporação medidos nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e terrestre (TCAT).

TABELA 5 – Totais mensais de evaporação (mm) medidas nos Tanques Classe A, em 245 dias de fevereiro a novembro de 2008.

Ano 2008	TCAA	TCAT
Fevereiro	192,75	184,43
Março	117,30	106,92
Abril	62,59	62,59
Maio	83,34	81,90
Junho	132,72	140,04
Julho	205,01	220,15
Agosto	201,41	222,23
Setembro	232,60	244,92
Outubro	264,96	295,94
Novembro	229,51	254,14
Totais	1722,19	1813,26

A razão entre os totais evaporados nos tanques (TCAT) e (TCAA) definiu o coeficiente de passagem (k_p) igual a 0,95. O mesmo valor foi obtido por Molle (1989) ao relacionar o rebaixamento do espelho d' água no açude Juá (Tauá, CE) com a evaporação medida no tanque Classe A para um período de 34 meses.

4.5. Avaliação dos métodos de estimativa da evaporação

Os dados meteorológicos coletados durante os meses de fevereiro a novembro de 2008 foram utilizados para estimar a evaporação por meio das equações propostas por Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993).

As Tabelas 6 e 7 mostram o comparativo estatístico entre valores estimados e medidos da evaporação. Os valores estimados através do método de Penman (1948) não diferiram estatisticamente dos valores medidos no tanque (TCAA), diferindo dos valores medidos no tanque (TCAT) nos meses de julho, agosto, setembro, outubro e novembro. Para os métodos de Linsley (1982) e Linacre (1993) foram observadas diferenças estatísticas em relação aos valores medidos nos tanques, tanto em ambiente aquático (TCAA) como terrestre (TCAT).

TABELA 6 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas no tanque Classe A (TCAA) e estimadas através dos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

Ano 2008	ECAA	Penman	Linsley	Linacre
Fevereiro	7,41a	6,85a	2,62c	4,53b
Março	5,86a	5,21a	0,71c	3,63b
Abril	4,81a	4,29ab	0,93c	2,83b
Maio	5,21a	5,28a	1,36c	3,53b
Junho	5,53a	5,27a	2,21c	3,50b
Julho	6,61a	6,30a	3,60b	4,08b
Agosto	7,46a	7,49a	4,41b	4,89b
Setembro	8,31a	8,15a	5,78b	5,32c
Outubro	8,55a	8,54a	6,36b	5,51c
Novembro	7,91a	7,95a	5,48b	5,24b
Período	7,03a	6,82a	3,75c	4,48b

Médias seguidas por letras iguais, dentro da mesma linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância.

A Figura 32 a 37 mostram as curvas da evaporação diária estimada pelos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) e medida nos tanques Classe A em ambiente aquático (TCAA) e Terrestre (TCAT). Verifica-se que o método de Penman (1948) foi o que apresentou curvas de estimativas mais próximas das curvas de evaporação medidas nos tanques Classe A, tanto em ambiente aquático (TCAA) quanto Terrestre (TCAT).

TABELA 7 – Teste de Tukey para as médias mensais de evaporação medidas no tanque Classe A (TCAT) e estimadas através dos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

Ano 2008	ECAT	Penman	Linsley	Linacre
Fevereiro	7,09a	6,85a	2,62c	4,53b
Março	5,35a	5,21a	0,71c	3,63b
Abril	4,81a	4,29ab	0,93c	2,83b
Maio	5,12a	5,28a	1,36c	3,53b
Junho	5,83a	5,27a	2,21c	3,50b
Julho	7,10a	6,30b	3,60c	4,08c
Agosto	8,23a	7,49b	4,41c	4,89c
Setembro	8,75a	8,15b	5,78c	5,32d
Outubro	9,55a	8,54b	6,36c	5,51d
Novembro	8,76a	7,95b	5,48c	5,24c
Período	7,40a	6,82b	3,75d	4,48c

Médias seguidas por letras iguais, dentro da mesma linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância.

As Figuras 38 a 40 mostram as correlação entre valores diários da evaporação estimados e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA). Conforme metodologia proposta por Camargo e Sentelhas (1997), o método de Penman (1948) apresentou desempenho sofrível e os métodos de Linsley (1982) e Linacre (1993) apresentaram desempenho péssimo (Tabela 8).

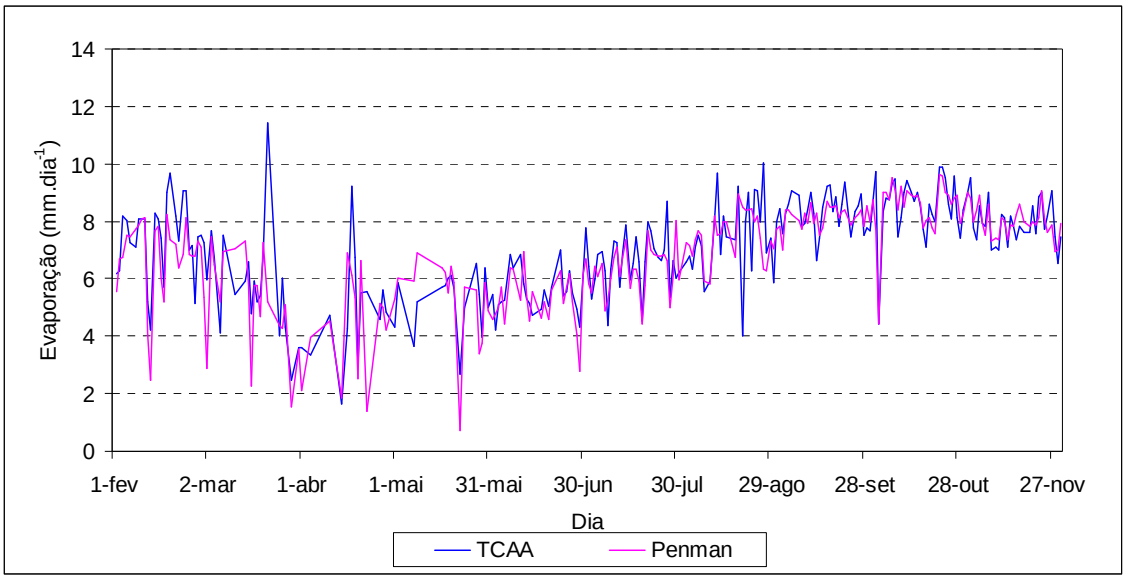

FIGURA 32 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Penman (1948), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

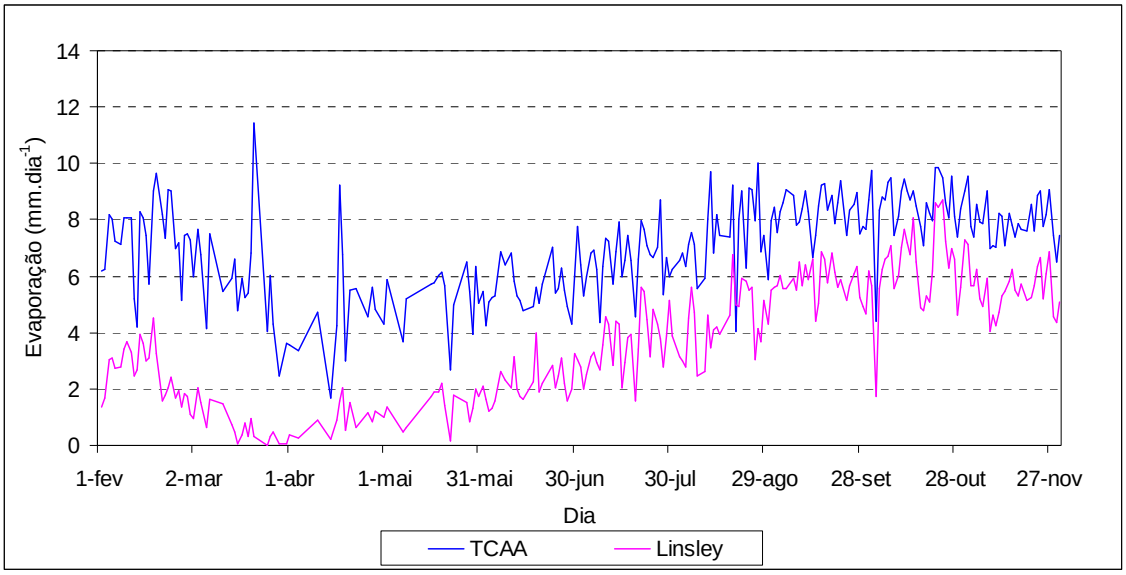

FIGURA 33 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Linsley (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

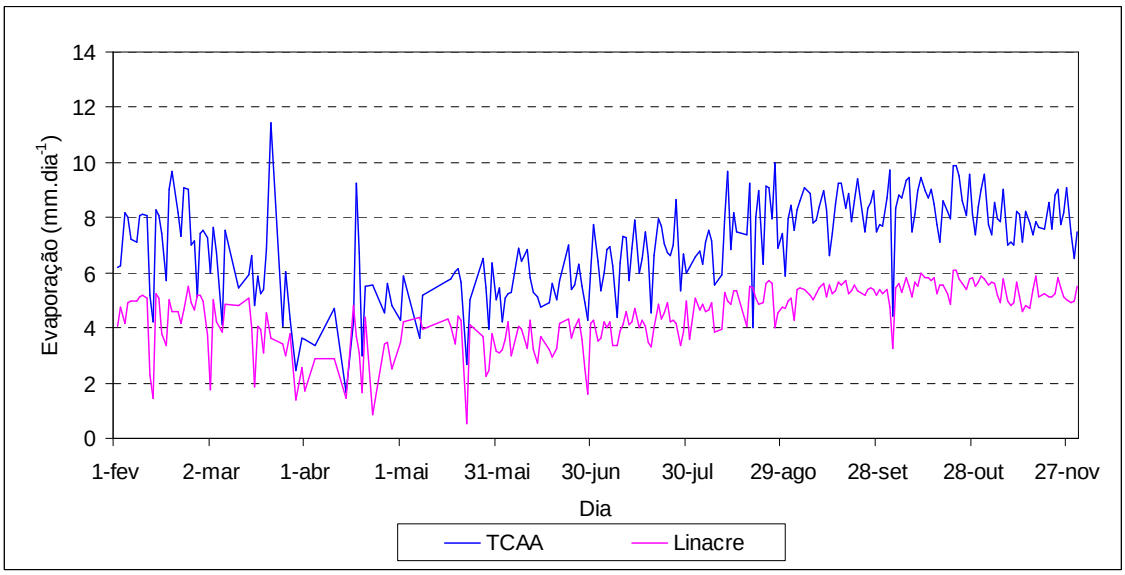

FIGURA 34 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA) e estimados pelo método de Linacre (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

As Figuras 41 a 43 mostram as correlação entre valores diários da evaporação estimados e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT). Na Tabela 8 pode ser observado que de acordo com metodologia proposta por Camargo e Sentelhas (1997) o método de Penman (1948) apresentou desempenho classificado como bom, o método de Linsley (1982) apresentou desempenho mau e o desempenho apresentado por Linacre (1993) foi péssimo.

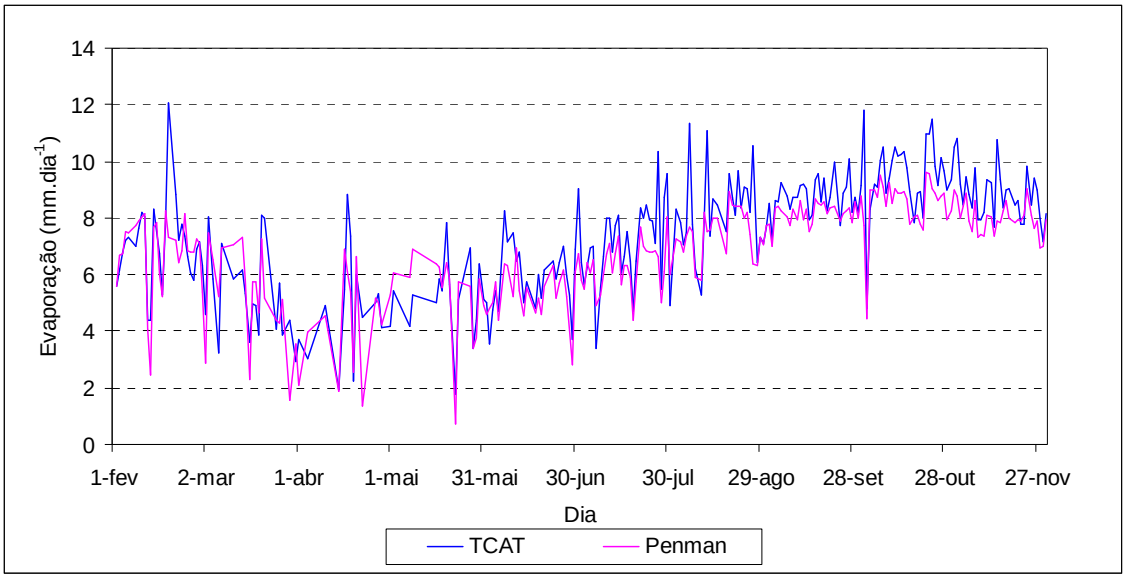

FIGURA 35 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Penman (1948), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

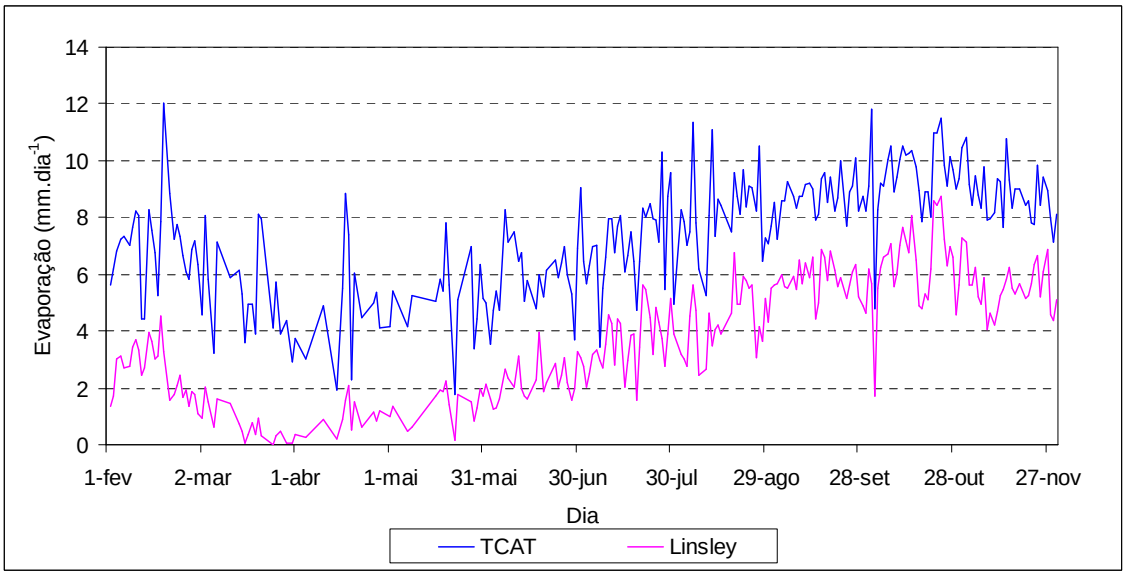

FIGURA 36 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Linsley (1982), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

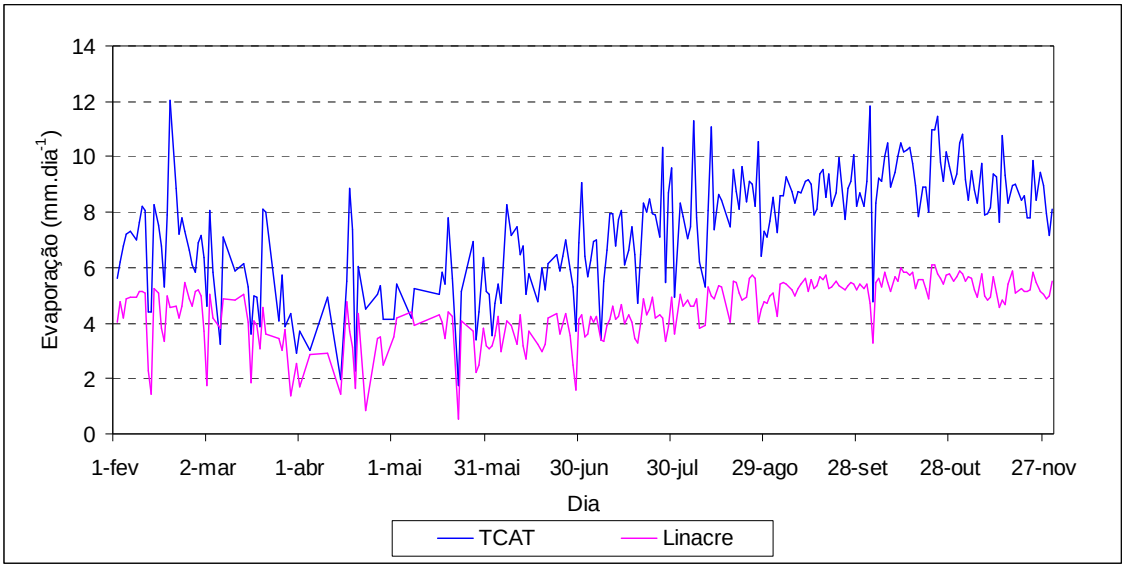

FIGURA 37 – Valores de evaporação medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT) e estimados pelo método de Linacre (1993), durante os meses de fevereiro a novembro de 2008.

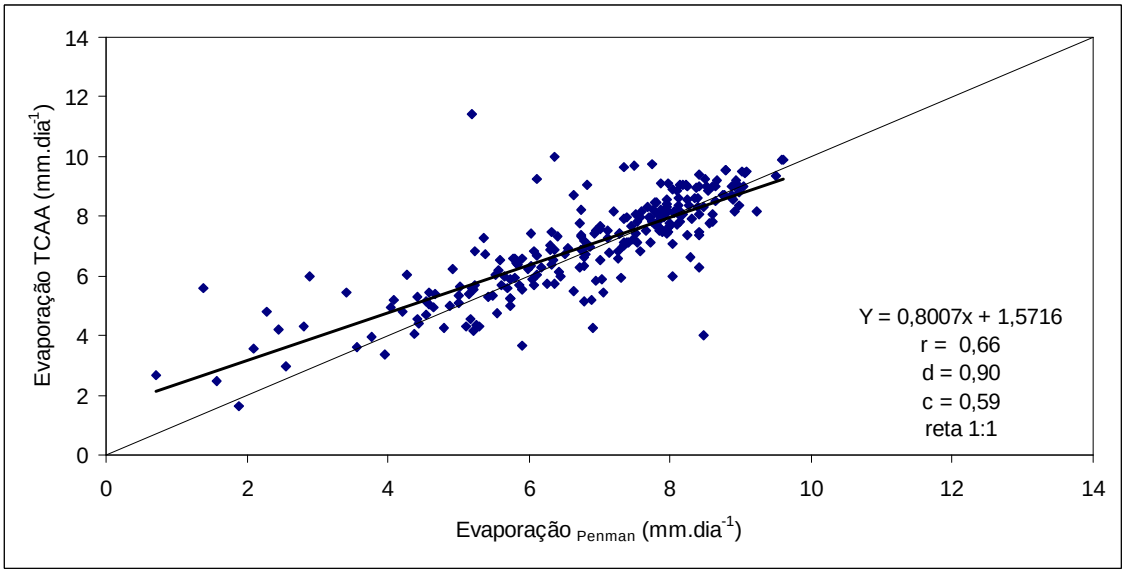

FIGURA 38 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Penman (1948) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

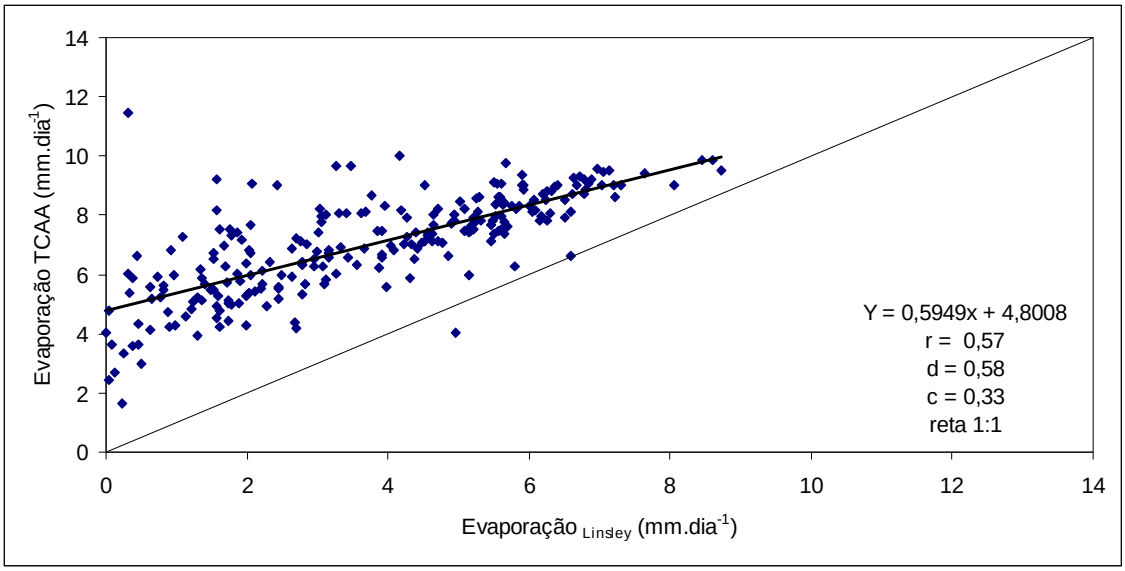

FIGURA 39 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linsley (1982) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

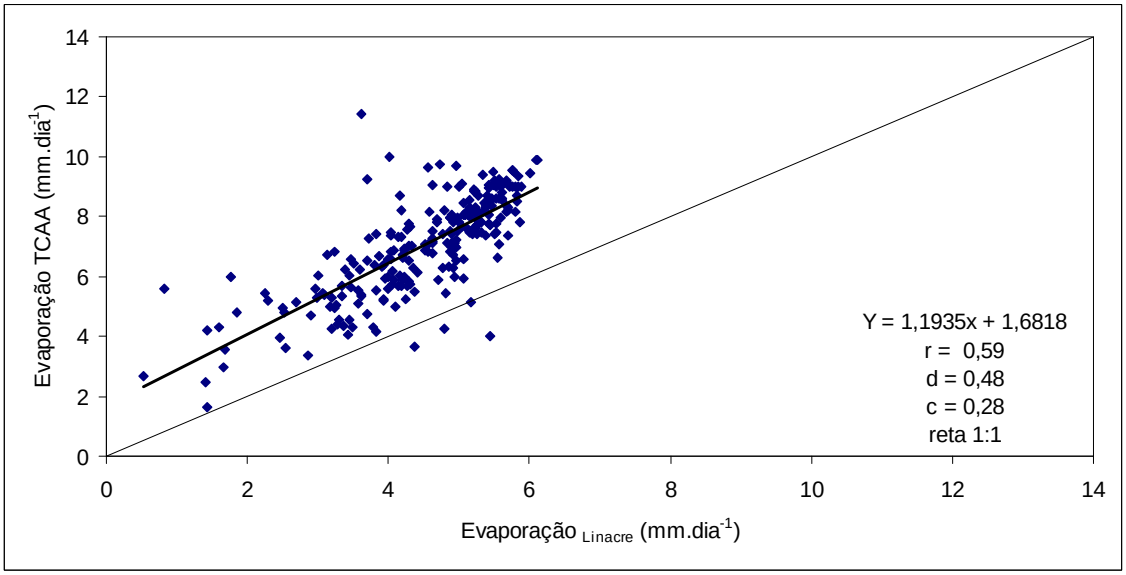

FIGURA 40 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linacre (1993) e medidos no tanque Classe A em ambiente aquático (TCAA).

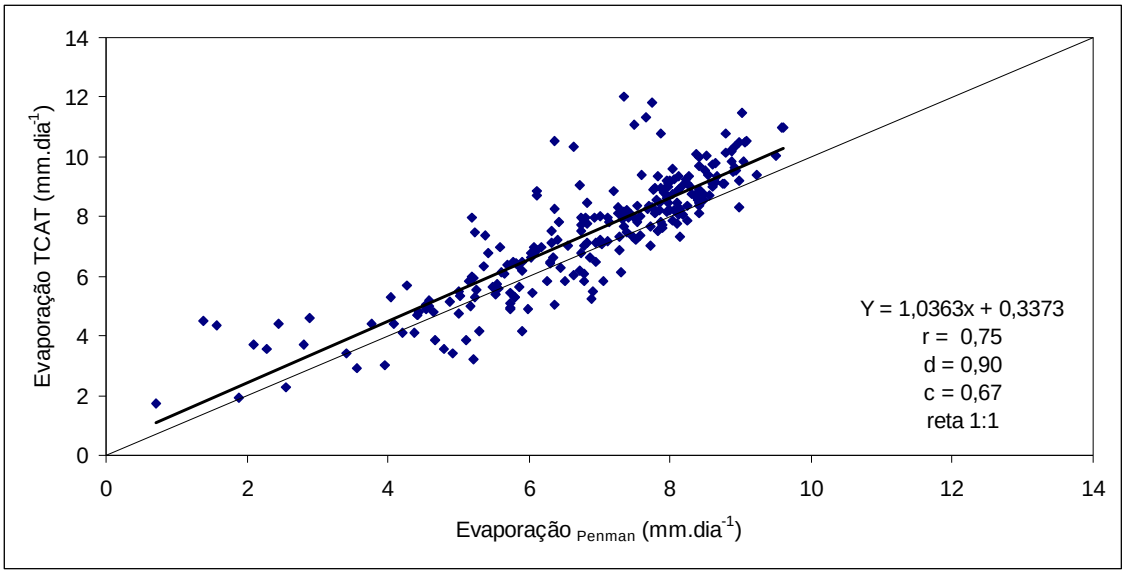

FIGURA 41 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Penman (1948) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

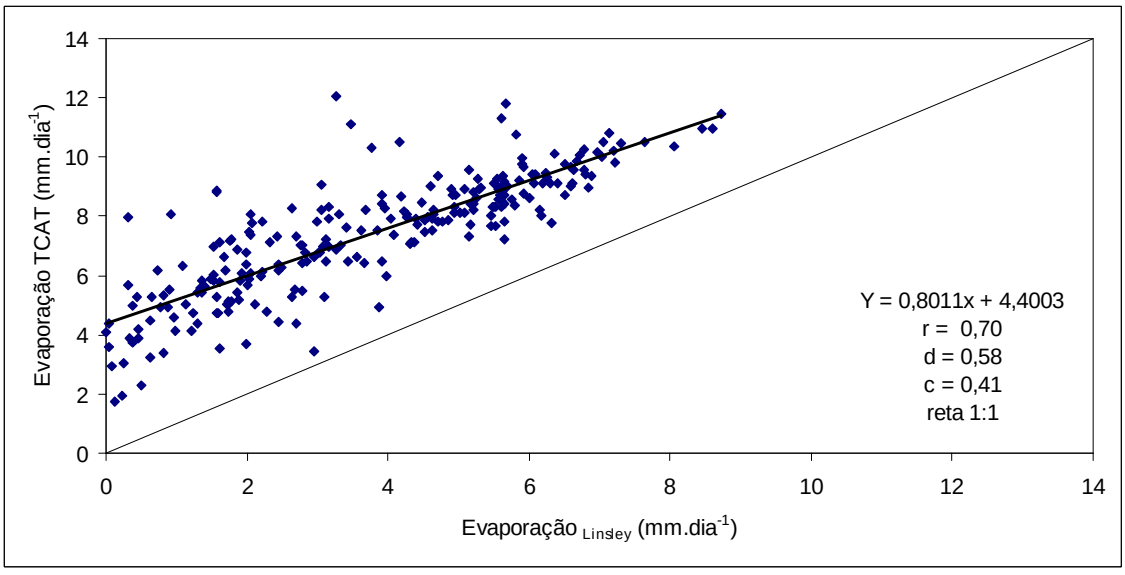

FIGURA 42 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linsley (1982) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

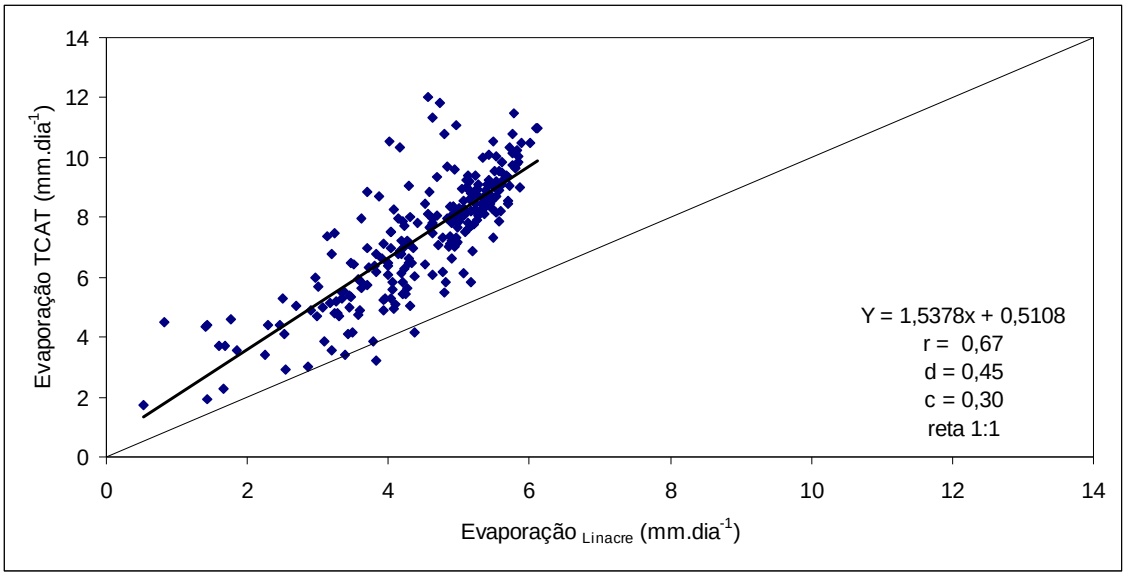

FIGURA 43 – Relação entre valores de evaporação estimados com a equação de Linacre (1993) e medidos no tanque Classe A em ambiente terrestre (TCAT).

TABELA 8 – Desempenho dos métodos de estimativa da evaporação, de acordo com o índice "c", em relação às medidas dos tanques Classe A instalados nos ambientes aquático (TCAA) e terrestre (TCAT).

Método	TCAA		TCAT	
	Índice "c"	Desempenho	Índice "c"	Desempenho
Penman (1948)	0,59	Sofrível	0,67	Bom
Linsley (1982)	0,33	Péssimo	0,41	Mau
Linacre (1993)	0,28	Péssimo	0,30	Péssimo

Leitão (2007) realizando estudos sobre a evaporação no estado da Paraíba, utilizou medidas diárias de evaporação de um tanque de 20m^2 para avaliar o desempenho dos métodos de estimativa propostos por Penman (1948), Linacre (1993), Snyder (1992), Kohler et al. (1995), Gangopadhyaya et al. (1966), Hounam (1973) e balanço de energia – razão de Bowen. Com base nos indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas (1997), concluiu que o método de Snyper (1992) foi o que apresentou o melhor desempenho, enquanto os piores desempenhos foram apresentados pelos métodos de Penman (1948) e Kohler (1995).

O método de Penman (1948) superestimou a evaporação medida no tanque (TCAA) em 1,4%, 0,5% e 0,4% nos meses de maio, agosto e novembro, respectivamente e subestimou em 7,6%, 11,1%, 10,8%, 4,8%, 4,7%, 1,9%, e 0,1% nos meses de fevereiro, março, abril, junho, julho, setembro e outubro, respectivamente, para todo o período (fevereiro a novembro) apresentou subestimativa de 3,0%. O método de Linacre (1993) subestimou em 38,9%, 38,1%, 41,2%, 32,2%, 36,8%, 38,3%, 34,5%, 35,9%, 35,5% e 33,7% nos meses de fevereiro,

março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, respectivamente e também apresentou subestimativa de 36,3% para todo o período de medição. O método proposto por Linsley (1982) apresentou subestimativas de 64,7%, 87,9%, 80,7%, 73,8%, 60,0%, 45,6%, 40,9%, 30,4%, 25,6% e 30,8% para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, respectivamente e de 46,7% para todo o período de medição (Tabela 9).

O método de Penman (1948) superestimou a evaporação medida no tanque (TCAT) em 3,1% no mês de maio, subestimou em 3,4%, 2,5%, 10,8%, 9,8%, 11,3%, 8,9%, 6,9%, 10,6%, e 9,3% nos meses de fevereiro, março, abril, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, respectivamente, para todo o período de medição apresentou subestimativa de 7,9%. O método proposto por Linacre (1993) subestimou em 36,2%, 32,0%, 41,2%, 31,0%, 40,1%, 42,6%, 40,6%, 39,2%, 42,3%, 40,2% nos meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro, respectivamente, e em 39,5% considerando todo o período de medição. O método de Linsley (1982) apresentou subestimativas para os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro assim como para todo o período de medição com valores de 63,1%, 86,7%, 80,7%, 73,4%, 62,1%, 49,4%, 46,4%, 33,9%, 33,4%, 37,5% e 49,4%, respectivamente (Tabela 9).

TABELA 9 – Totais mensais de evaporação (mm) medidos nos tanques Classe A e estimados através dos métodos de Penman (1948), Linsley (1982) e Linacre (1993) no período de fevereiro a novembro de 2008.

Ano 2008	TCAA	TCAT	Penman	Linsley	Linacre
Fevereiro	192,75	184,43	178,10	68,11	117,72
Março	117,30	106,92	104,24	14,17	72,65
Abril	62,59	62,59	55,80	12,09	36,79
Maio	83,34	81,90	84,48	21,80	56,51
Junho	132,72	140,04	126,38	53,04	83,91
Julho	205,01	220,15	195,32	111,48	126,42
Agosto	201,41	222,23	202,34	119,11	131,99
Setembro	232,60	244,92	228,13	161,89	149,02
Outubro	264,96	295,94	264,63	197,23	170,76
Novembro	229,51	254,14	230,51	158,81	152,00
Totais	1722,19	1813,26	1669,92	917,74	1097,77

5. CONCLUSÕES

- Considerando os dez meses de estudo, a evaporação observada no tanque Classe A instalado em ambiente aquático foi inferior a evaporação observada no tanque Classe A em ambiente terrestre;

- Os efeitos diretos das variáveis climáticas, radiação solar incidente, umidade relativa, temperatura do ar e velocidade do vento sobre evaporação, foram menores no tanque Classe A instalado em ambiente aquático;

- O tanque Classe A instalado em ambiente aquático apresentou comportamento térmico próprio de reservatórios hídricos, com pouca variação de temperatura da água entre os dias e as noites;

- As estimativas do método de Penman (1948) não apresentaram diferenças estatísticas em relação aos valores medidos no tanque Classe A instalado em ambiente aquático. Através deste método, também foram estimadas as curvas de evaporação que mais se aproximaram às curvas de evaporação dos tanques Classe A. O seu desempenho foi superior, em relação aos demais métodos avaliados, e os seus erros relativos foram os menores.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotraspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 297p.

AQUINO, M. D. **Estudo da evaporação de superfícies livres de água no semi-árido.** 1986. 190 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1986.

BEZERRA, C.C.; LEITÃO, M. de M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. de.; SILVA, A. S. L. Avaliação do aquecimento da água em tanques de cimento amianto e Classe A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu. **Anais…** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. 1 CD-ROM.

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

CUENCA, R. H. Crop water requirements. In:___. **Irrigation system design**. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1989. cap. 5, p. 115 – 188.

DALTON, J. Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat. Mem. Manchester Liter. and Phil. Soc., 5-11, 535-602. 1802.

HOUNAM, C. E. **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: World Meteorological Organization. Rapporteur on Lake Evaporation, 1973. 52 p. (Nota técnica n° 126).

JACOBS, A. F. G.; HEUSINKVELD, B. G.; LUCASSEN, D. C. Temperature variation in a class A evaporation pan. **Journal of Hydrology**, v. 206, p.75-83, dez. 1998.

LEITÃO, M. de M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M de.; LEITÃO T. J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.6, p.585-593, nov./dez. 2007.

LINACRE, E. T. A Simple Formula for estimating evaporation retes in varius climates, using temperatura data alone. **Agricultural Meteorology**, **Elsevier**, Amsterdan, v.18, n.6, p. 409 -424, dez. 1977.

LINACRE, E. T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. **Agricutural and Forest Meteorology**, **Elsevier**, Amsterdan, v. 64, n.3-4, p. 237 – 256, mai. 1993.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. Evaporation and transpiration. In:___. **Hydrology for engineers**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1982. cap. 5, p. 134 – 174.

MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Série Hidrologia / 25. Recife: SUDENE / DPG / PRN / GT. HME, 1989. 175p.

MURRAY, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. **Journal Applied Meteorology**, Santa Monica, v. 6, p. 203 – 204, fev. 1967.

OLIVEIRA, G. M de. **Estudo da evaporação nas microregiões do Cariri e Sertão da Paraíba.** 2003. 203f Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

PAPA, S. E. **Estimativas cruzadas da evaporação no estado do Ceará pelos métodos: Tanque Classe A, atmômetro de Piche e equação de Penman.** 2002. 54f. Tese (Mestrado em Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, A - Series, London, v.193, p.120 – 145, abr. 1948.

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

ROQUE, R.O.; SANSIGOLO, C.A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 21-28, jan/mar. 2001.

SLEIGHT, R.B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, v.10, n.5, p.209-261, 1917.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. do. Evaporação. In:___. **Meteorologia Descritiva: Fundamentos e aplicações brasileiras**. 1 ed. São Paulo: Nobel, 1992. cap. 11, p. 263 - 281.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Evaporação e evapotranspiração. In:____. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. Recife: INMET / MAB, 2006. cap. 10, p. 393 – 442.

VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M. A atmosfera em movimento. In:___ **Meteorologia e Climatologia Agrícolas**. Fortaleza, 2008. unidade 4, p. 77 – 96. (Apostila).

WILLIAMS, R. A tartaruga e a lebre**. Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos, n. 1, nov. 2001. Disponível. em:<http://cdcc.usp.br/ciencia/artigos/art_01/tartarugalebre.html>. Acesso em: 10 jan. 2009.

Young, A. A. **Evaporation from water surface in California: summary of pan records and coeffcients, 1881 – 1946**. Sacramento: Public Works Department, 1947. 68 p. (Boletim 54).