



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

**ESCOLA POLITÉCNICA**

**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS SITUADOS  
EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA: USO DE BACIA EXPERIMENTAL**

**ANDREA SOUSA FONTES**

Salvador – Bahia  
2005



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**

**ESCOLA POLITÉCNICA**

**MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS SITUADOS  
EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA: USO DE BACIA EXPERIMENTAL**

**ANDREA SOUSA FONTES**

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Yvonilde D. P. de Medeiros

Salvador – Bahia  
2005

**ANDREA SOUSA FONTES**

**ESTUDO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS SITUADOS  
EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA: USO DE BACIA EXPERIMENTAL**

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Yvonilde D. P. de Medeiros

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana – MEAU – da UFBA em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Salvador – Bahia  
2005

**ANDREA SOUSA FONTES**

**ESTUDO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS SITUADOS  
EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA: USO DE BACIA EXPERIMENTAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana – MEAU – da UFBA em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Salvador, de de 2005

Banca Examinadora:

Yvonilde Dantas Pinto Medeiros \_\_\_\_\_  
Doutora em Hidrologia, UFBA

Arthur Mattos \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Civil Hidráulica e Saneamento, UFRN

Lafayette Dantas da Luz \_\_\_\_\_  
Doutor em Civil And Environmental Engineering, UFBA

Alberto Brum Novaes \_\_\_\_\_  
Doutor em Física da Atmosfera, UFBA

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha filha SARA, pelo amor, compreensão e confiança, e a minha filha RANA, por todos os sorrisos e chorinhos.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado força e tranquilidade para transpor as dificuldades encontradas durante esta caminhada. Obrigada, Senhor, por permitir a concretização deste momento.

A meu marido Jarilson, a meus pais, Benjamim e Graça, e a minhas irmãs Vanessa e Susane, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, sem o qual esse trabalho não teria chegado ao final.

À Escola Politécnica da UFBA que me acolheu e tornou possível a viabilização do presente trabalho, concedendo os recursos materiais necessários; à CAPES pela bolsa de estudos.

Ao CT-HIDRO, FINEP, FUNPEC e a Rede de Hidrologia do Semi-árido (REHISA), responsáveis pela implantação do Projeto Integrado de Implantação de Bacia Experimental do Semi-árido (IBESA), no qual a unidade de pesquisa do presente trabalho está inserida.

A Professora Yvonilde Medeiros, um agradecimento especial, pelas orientações acadêmicas e profissionais e pela acolhida no seu grupo de pesquisa, que resultou no meu despertar para os recursos hídricos.

Aos Professores Lafayette Luz, Iara Brandão e Alberto Brum Novaes pelas contribuições durante as defesas desse trabalho, sem as quais essa pesquisa seria mais limitada e menos relevante.

Ao Professor Arthur Mattos pelo carinho, incentivo e ensinamentos dados de fundamental importância para minha dissertação.

Aos professores do Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da UFBA.

Aos colegas Alessandra, João Ilton e Clélia, pelas trocas de experiências, cujo apoio importantíssimo ajudou a minimizar a insegurança nessa caminhada. E a todos os meus amigos agradeço a amizade e atenção indispensáveis neste período.

Aos funcionários do MEAU, principalmente Isabel pela amizade e ajuda prestada.

Aos colegas do Grupo de Recursos Hídricos pelo incentivo, apoio e amizade, especialmente a Diego, companheiro de pesquisa e a equipe do Projeto IBESA.

À minha família pelas orações e “torcida”.

À comunidade do Município de São Domingos pela acolhida.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram ao sucesso deste trabalho.

Muito Obrigada!!!

## RESUMO

Diante do cenário característico das bacias hidrográficas localizadas na região semi-árida referente a: (i) carência de dados hidroclimatológicos, (ii) utilização de águas armazenadas em açudes como principal fonte de atendimento às demandas; (iii) altas taxas de evaporação características da região, que causam significativas perdas de qualidade e quantidade dessas águas reservadas; (iv) elevada complexidade na determinação da evaporação em açudes devido ao envolvimento de um conjunto de variáveis de influência desse fenômeno; (v) situação atual dos reservatórios apresentando problemas de salinização e (vi) constante escassez de água para atendimento às demandas, a presente pesquisa tem o objetivo de comparar os métodos de estimativa de evaporação para estudo desse fenômeno em reservatórios da região semi-árida a partir do uso de bacia experimental. Para tal estudo foi utilizada como unidade de pesquisa a bacia experimental do rio do Cedro, localizada do semi-árido baiano, instrumentada com estações climatológica, pluviográfica e fluviográfica para coleta de dados referentes às variáveis de influência no processo de evaporação.

A estimativa da evaporação foi realizada por meio da aplicação de métodos consolidados nesse tipo de estudo com ampla aplicação na região analisada, sendo estes: o Método do Balanço de Energia, de Penman, de Priestley e Taylor, da Relação Complementar proposto por Morton e do Balanço Hídrico. Durante o período de estudo foi realizada medição no evaporímetro tipo Tanque Classe A para comparação dos resultados, uma vez que esse equipamento tem seu uso bastante difundido na região semi-árida pelo seu custo e facilidade de operação.

Os resultados dessa pesquisa são utilizados para: (i) caracterização da evaporação na bacia experimental durante o período de estudo, (ii) verificação da confiabilidade e precisão da informação gerada pela aplicação desses métodos e medição em Tanque Classe A e (iii) avaliação da utilização de bacia hidrográfica experimental como base de dados para estudos da evaporação em açudes situados no semi-árido como forma de obter informações para uma gestão mais eficiente da disponibilidade hídrica em bacias dessa região.

**PALAVRAS-CHAVE:** Evaporação em reservatórios; região semi-árida; bacia experimental.

## ABSTRACT

Ahead of the featured scene of the hydrografic basins based on the half arid region relating to : (i) the lack of hydro and climate data , (ii) the use of stored waters in the dams as the main source of attendance of the demand, (iii) the high rates of evaporation characteristic of the region, that cause meaningful loss of quality and quantity of those allocated waters; (iv) the high complexity about the determination of the evaporation in the dams due to the involvement with a set of the varieties that influence that phenomenon; (v) the current situation of the reservoir presenting salts problems and the constant lack of water to attend to the demand, this current research has the aim of comparing the methods of the evaporation estimate for a study of that phenomenon in the reservoir of the semi-arid region from the use of an experimental basin. For such study it was used as a research unit the experimental basin of the river Cedro , based on Bahia's semi-arid region, which has climate stations to collect data relating to the varieties of the influence in the evaporation process.

The estimate of the evaporation was done through the application of the consolidated methods in that kind of study with a broad application in the studied region, they are: the Energy Budget Method, Penman's Approach, Priestley and Taylor's Approach, the Complementary Relationship purposed by Morton and Water Budget Method. During the study time, it was done the measurement with the equipment Class A pan to compare the results, since that equipment has its own use highly spread in the semi-arid region due to its cost and its easy operation.

The results of that research are used to: (i) characterize the evaporation in the experimental basin during the study time, (ii) check the confidence and precision of the created information by the application of those methods and measurement in Class A pan and the assessment in the use of the experimental basin as data base for studies in evaporation in the dams based on the semi-arid region as a source of obtaining information to a more efficient management of the water availability in basin of that region

**KEYWORD:** Evaporation in reservoirs; semi-arid region; experimental basin



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição espacial da evaporação e precipitação no Brasil (Fonte: INMET)	12
Figura 2: Representação esquemática da relação complementar (MORTON, 1983a)	25
Figura 3: Localização da Bacia do Rio Paraguaçu – Bahia	69
Figura 4: Localização da bacia experimental do rio do Cedro na Bacia do Rio Paraguaçu – Bahia	70
Figura 5: Açude de São Domingos – maio 2002	71
Figura 6: Açude de Nenenzinho – maio 2002	72
Figura 7: Açude de Flori – setembro de 2002	73
Figura 8: Perfil longitudinal do rio do Cedro	74
Figura 9: Representação do relevo da BHEC	74
Figura 10: Classificação pedológica da BHEC	75
Figura 11: Vegetação predominante na BHEC	77
Figura 12: Estação climatológica automática	78
Figura 13: Conjunto evaporimétrico tipo Tanque Classe A	79
Figura 14: Estação pluviográfica	80
Figura 15: Calha Parshall 5' e linígrafo de ultrassom	81
Figura 16: Régua linimétrica – açude de Nenenzinho – novembro 2003	82
Figura 17: Posição das régua linimétrica – açude de Flori – novembro 2003	82
Figura 18: Posição das régua linimétrica – calha do rio a montante do açude São Domingos	83
Figura 19: Distribuição espacial dos equipamentos	86
Figura 20: Calha Parshall 5' danificada	87
Figura 21: Açude de Nenenzinho	111
Figura 22: Açude de Nenenzinho extravasando – janeiro 2004	112
Figura 23: Nível do açude de Nenenzinho – janeiro 2004	112
Figura 24: Tanque intermediário do conjunto evaporímetro	124
Figura 24: Entradas e saídas de água do açude de São Domingos	131

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Temperatura do ar mensal	89
Gráfico 2: Umidade Relativa do ar mensal	89
Gráfico 3: Radiação solar global mensal	90
Gráfico 4: Velocidade do vento mensal	90
Gráfico 5: Comparação dos valores de evaporação medida em tanque e calculada pelo modelo de Morton para o período de dados coincidentes.	117
Gráfico 6: Evaporação potencial mensal (mm) calculada pelos métodos de Balanço de Energia, Priestley e Taylor, Penman e Morton.	120
Gráfico 7: Evaporação real mensal (mm) calculada pelos métodos de Morton, balanço Hídrico e medida e Tanque Classe A.	123
Gráfico 8: Balanço hídrico – novembro de 2003 a outubro de 2004	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação cota X área X volume do açude de Nenenzinho	72
Tabela 2: Relação cota x área x volume do açude de Flori	73
Tabela 3: Parâmetros característicos da bacia experimental	73
Tabela 4: Coordenadas das estações pluviográficas	85
Tabela 5: Radiação solar recebida no topo da atmosfera em cal/cm <sup>2</sup> .dia	92
Tabela 6: Radiação líquida diária em cal/cm.dia – 2003	93
Tabela 7: Radiação líquida diária em cal/cm.dia – 2004	94
Tabela 8: Evaporação diária em mm - 2003	96
Tabela 9: Evaporação diária em mm – 2004	97
Tabela 10: Evaporação diária em mm - 2003	99
Tabela 11: Evaporação diária em mm – 2004	100
Tabela 12: Evaporação diária em mm – 2003	101
Tabela 13: Evaporação diária em mm – 2004	102
Tabela 14: Estimativa da radiação global no topo da atmosfera (GE) em W/m <sup>2</sup>	104
Tabela 15: Evaporação estimada pelo método de Morton para o ano de 2003	107
Tabela 16: Evaporação estimada pelo método de Morton para o ano de 2004	108
Tabela 17: Evaporação Potencial mensal (mm) estimada pelo método de Morton para o ano de 2003	109
Tabela 18: Evaporação Potencial mensal (mm) estimada pelo método de Morton para o ano de 2004	109
Tabela 19: Evaporação mensal estimada pelo método do Balanço Hídrico	113
Tabela 20: Dados observados do Tanque Classe A – ano 2003	114
Tabela 21: Dados observados do Tanque Classe A – ano 2004	115
Tabela 22: Comparação da evaporação medida em tanque e calculada pelo método de Morton	116
Tabela 23: Comparação entre os métodos utilizados para estimativa da evaporação (mm) na bacia experimental do rio do Cedro – ano 2003	119
Tabela 24: Comparação entre os métodos utilizados para estimativa da evaporação (mm) na bacia experimental do rio do Cedro – ano 2004	119
Tabela 25: Comparação entre os valores de radiação solar na parte externa da atmosfera utilizados	121

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE GRÁFICOS

## LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO	19
2.1.1	Lei de Dalton	20
2.1.2	Razão de Bowen	20
2.1.3	Balanço de Energia	21
2.1.4	Método de Penman	23
2.1.5	Método de Priestley e Taylor	24
2.1.6	Método de Morton – Relação complementar	24
2.1.7	Balanço Hídrico	27
2.1.8	Evaporímetros	30
2.1.9	Comparação entre os métodos	31
2.1.10	Disponibilidade de dados	32
2.2	CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO	33
2.3	EXPERIÊNCIAS DE ESTIMATIVAS DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS	37
2.4	BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO HIDROCLIMATOLÓGICO	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>44</b>
3.1	IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL	44
3.1.1	Seleção do local de implantação	45
3.1.2	Reconhecimento da área	46
3.1.3	Instrumentação da bacia experimental	46
3.1.4	Escolha do local de instalação	49
3.2	ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO	51
3.2.1	Aquisição e tratamento dos dados	51
3.2.2	Cálculo da evaporação	51

3.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO	65
3.3.1	Comparação dos valores estimados da evaporação	65
3.3.2	Análise do comportamento da evaporação na bacia hidrográfica experimental	66
3.3.3	Avaliação da bacia hidrográfica experimental para estudo da evaporação	66
<b>4</b>	<b>BACIA EXPERIMENTAL DO RIO DO CEDRO</b>	<b>67</b>
4.1	IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL	67
4.1.1	Seleção do local de implantação	67
4.1.2	Reconhecimento e caracterização da área de estudo	68
4.1.3	Instrumentação da bacia experimental	78
4.1.4	Escolha do local de instalação	83
4.2	ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO	86
4.2.1	Aquisição e tratamento dos dados	86
4.2.2	Dados coletados	88
4.2.3	Cálculo da evaporação	90
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>118</b>
5.1	AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO	118
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA EVAPORAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL	125
5.3	AVALIAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL	128
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>138</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>141</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é o insumo básico da sobrevivência de todas as espécies e indicador do desenvolvimento de uma região que vem sofrendo impacto causado pelo incremento das necessidades hídricas e utilização inadequada desse recurso.

No Brasil esse quadro tem sua complexidade acentuada devido, principalmente, aos seguintes fatores: irregularidade espacial e temporal da disponibilidade de água e deficiência de monitoramento hidroclimatológico no seu território para subsidiar o entendimento do comportamento dos seus mananciais.

Em relação ao primeiro fator, tem-se como exemplo os dados do balanço hídrico da Bacia Amazônica, com escoamentos superficiais na ordem de 34,2 l/s/km<sup>2</sup>, enquanto na região semi-árida são registrados escoamentos de 2,81 l/s/km<sup>2</sup> (BRASIL, 2000). Percebe-se, assim, a grande diversidade hidrológica do território brasileiro, sendo que a região semi-árida configura o cenário mais crítico no que se refere à escassez hídrica, necessitando de dados e informações para implantação de uma gestão que vise a racionalização do uso de suas águas com base na sua realidade hidroclimática.

O semi-árido brasileiro soma 860.342 km<sup>2</sup>, abrangendo grande parte dos oito estados do Nordeste, onde vivem cerca de 25 milhões de pessoas. O clima da região é caracterizado pela insuficiência de precipitações (500 a 700 mm/ano) e pelas altas taxas de evaporação (2.000 mm/ano). Além de escassas, as chuvas apresentam-se extremamente irregulares quanto à sua distribuição temporal e espacial. O resultado é a baixa disponibilidade de água para o ecossistema e fragilidade dos sistemas econômicos que dependem destas precipitações.

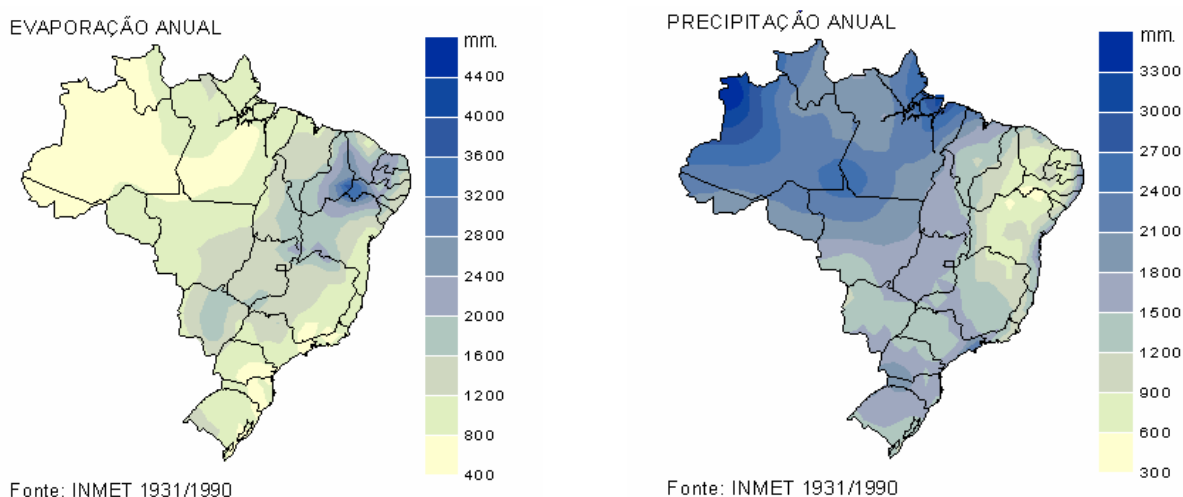
O semi-árido é caracterizado por um regime pluviométrico envolvendo chuvas concentradas, geralmente de 3 a 5 meses, e uma alta variabilidade anual. Essas condições geralmente ocorrem associadas a altas taxas de evaporação e algumas vezes com baixa permeabilidade do

solo. Essa combinação gera rios intermitentes com estações sem escoamento que pode levar de seis a nove meses ou até todo o ano quando ocorrem secas severas.

Desse modo, para garantir o atendimento das demandas de água nos períodos de seca, aproveitando-se a água excedente dos meses úmidos, tem-se como prática a construção de reservatórios.

No semi-árido, mais de 70 mil açudes foram construídos para atender as demandas, apresentando significativas perdas de água por evaporação e elevada concentração de sais. Dessa forma, o conhecimento das perdas por evaporação de maneira criteriosa tem grande influência na determinação do volume disponível para os diversos usos e garantia de atendimento das demandas de água.

A **Figura 1** apresenta a distribuição espacial da evaporação no Brasil, que aliada à distribuição da precipitação retrata e confirma o cenário crítico no qual o semi-árido está inserido.



**Figura 1: Distribuição espacial da evaporação e precipitação no Brasil (Fonte: INMET)**

Percebe-se que os valores mais críticos para a disponibilidade de água estão apresentados na região nordeste, gerando a já comentada restrição desse recurso.

A evaporação que ocorre nos lagos dos reservatórios causa perda significativa de volume de água para a atmosfera, deixando o manancial com concentração maior de poluentes. A redução desses efeitos da evaporação na quantidade e qualidade da água disponível em reservatórios é importante aliada para a garantia da preservação das fontes de abastecimento no semi-árido.

Entretanto a evaporação é um fenômeno complexo que depende das condições atmosféricas, da disponibilidade hídrica local e das características da superfície evaporante. A evaporação em reservatórios ainda sofre influência da geometria destes, profundidade e área inundada, e da composição da água armazenada. A carência de dados para estudos dessa natureza dificulta esse processo.

Os primeiros registros de coleta de dados hidrometeorológicos no Brasil são do início do século XX, tendo, originalmente, como alvo, a investigação para localizar as fontes de energia hidráulica e subsidiar empreendimentos de médio e grande porte. Diante disso percebe-se que as estações de medição desses dados foram implantadas na tentativa de monitorar as grandes bacias, ficando praticamente inexistente estudos em pequenas bacias (SILVA, 2001).

Outra questão importante a ser considerada é a falta de monitoramento das variáveis de influência na evaporação em ambientes de lagos, assim como medições dos perfis da temperatura da água, que informam a energia armazenada no corpo d'água, responsável por parte da evaporação.

A escassez de dados hidrológicos pode ser atenuada pela regionalização das informações disponíveis, sendo esta uma ferramenta muito utilizada para suprir essa deficiência em uma determinada área que se quer avaliar.

Destaca-se, nesse contexto da regionalização das informações, estudos em bacias hidrográficas experimentais como meio de caracterizar com maior precisão as relações entre



solo, água, vegetação e atmosfera, e transportar esse conhecimento para regiões hidroclimatologicamente semelhantes sem monitoramento dessas relações. Essas bacias configuram laboratórios em campo, densamente equipadas, para estudos detalhados dos processos físicos dentro do ciclo hidrológico. Dessa forma, dos estudos realizados com a implantação de bacias experimentais, pode-se extrair diretrizes de gestão para aplicação em locais desprovidos de informações.

Nesse contexto insere-se o tema deste trabalho que tem como título “**Estudo da Evaporação em Reservatórios Situados em Região Semi-árida: Uso de Bacia Experimental**” com o objetivo de comparar os métodos de estimativa de evaporação para estudo desse fenômeno em reservatórios da região semi-árida a partir do uso de bacia experimental. Para tal estudo foi utilizada como unidade de pesquisa a bacia experimental do rio do Cedro, localizada do semi-árido baiano, instrumentada com estações climatológica, pluviográficas e fluviográficas para coleta de dados referentes às variáveis de influência no processo de evaporação.

A estimativa da evaporação foi realizada por meio da aplicação de métodos consolidados nesse tipo de estudo com ampla aplicação na região analisada, sendo estes: o Método do Balanço de Energia, de Penman, de Priestley e Taylor, da Relação Complementar proposto por Morton e do Balanço Hídrico. Durante o período de estudo foi realizada medição no evaporímetro tipo Tanque Classe A para comparação dos resultados, uma vez que esse equipamento tem seu uso bastante difundido na região semi-árida pelo seu custo e facilidade de operação.

Os resultados dessa pesquisa são utilizados para: (i) caracterização da evaporação na bacia experimental durante o período de estudo, (ii) verificação da confiabilidade e precisão da informação gerada pela aplicação desses métodos e medição em Tanque Classe A e (iii) avaliação da utilização de bacia hidrográfica experimental como base de dados para estudos

da evaporação em açudes situados no semi-árido como forma de obter informações para uma gestão mais eficiente da disponibilidade hídrica em bacias dessa região.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O entendimento do fenômeno da evaporação está ligado tanto ao estudo da hidrologia quanto da meteorologia. Assim, para o entendimento desse processo físico de transferência da água da superfície em estado líquido para a atmosfera em estado gasoso, é necessário o conhecimento das variáveis que definem o clima e das variáveis associadas à movimentação da água na terra representada pelo ciclo hidrológico (WANIELISTA; KERSTEN; EAGLIN, 1997).

Deve-se observar que, dada à complexidade de se medir as perdas por evaporação e transpiração das plantas separadamente, o termo do balanço hídrico que fornece a representatividade da evaporação refere-se a evapotranspiração, que representa o processo combinado desses dois fenômenos. Os conceitos de evaporação e evapotranspiração se diferenciam pela definição da superfície evaporante. A evaporação é medida em superfícies de água, enquanto que a evapotranspiração é a análise das perdas de água para a atmosfera do solo e da vegetação (MOLLE, 1989). Para efeito do presente estudo serão abordados os assuntos referentes à evaporação por se tratar de uma análise em reservatórios.

A evaporação da superfície líquida envolve sempre o transporte simultâneo de massa e energia. Dessa forma os fatores essenciais para a ocorrência da evaporação são: a disponibilidade de energia para converter a água líquida em vapor e o mecanismo de transporte entre a superfície e a atmosfera (DIAS, 1986).

Para a análise da ocorrência da evaporação a partir do primeiro fator, é necessário o entendimento do balanço de radiação de uma determinada superfície para se fazer a estimativa da radiação líquida, ou seja, a radiação efetivamente absorvida por uma superfície. Entende-se por balanço de radiação a contabilização de toda a energia radiante recebida e perdida pela superfície.

O segundo fator necessário para que a água evapore da superfície líquida, referente ao mecanismo de transporte do vapor d'água entre a superfície e a atmosfera, associa a evaporação com o escoamento turbulento do ar. Esta abordagem dá lugar ao chamado balanço de massa para análise do processo de evaporação (DIAS, 1986).

A radiação solar tem comprimento de onda curto, sendo que parte da energia é absorvida pela atmosfera devido às moléculas de gases e partículas de poeiras aí presentes, parte é dispersa em direção ao espaço e parte em direção à Terra. Com relação à radiação que atinge a Terra, uma parcela da energia é refletida, configurando o albedo planetário, e o restante chega na superfície da Terra, atravessando as nuvens ou diretamente. Mais uma vez, da parcela que atinge a superfície, uma parte é refletida e outra é absorvida, esta última irá produzir o aquecimento na superfície, provocando a evaporação e a radiação térmica em direção à atmosfera. Esta radiação térmica tem comprimento de onda longo e é absorvida em grande parte pelos gases existentes na atmosfera, o que gera o aquecimento da atmosfera e a radiação volta para Terra (TUCCI; BELTRAME, 2000).

A partir desta distribuição da energia, tem-se que a radiação líquida representa a parcela da radiação incidente com comprimento de onda curto que é absorvida, menos a radiação emitida pela superfície com comprimento de onda longo, mais a parcela da radiação térmica com comprimento de onda longo absorvida pela superfície.

Todo o processo do movimento da água começa a partir da energia solar, devido à diferença espacial e temporal na taxa de energia recebida pela superfície terrestre, o que auxilia na circulação do ar, e é distribuída através dos processos de convecção nos corpos d'água e atmosfera e condução no solo. A convecção é a transferência vertical de calor pelo movimento das massas de ar, resultado da instabilidade causada pelo calor latente que é convertido em corrente de ar. A superposição desse fenômeno com a advecção, transferência horizontal do calor causada pela rotação da terra, devido às diferenças de temperatura e

pressão, gera o vento, sua direção e velocidade, de suma importância nas perdas por evaporação (WANIELISTA; KERSTEN; EAGLIN, 1997). Esse ar saturado em cima da superfície evaporante é renovado pela ação dos ventos.

A radiação solar é comprovadamente o elemento climático mais importante no processo da evaporação. Contudo, em regiões onde ocorrem advecções fortes, principalmente quando uma área úmida é circundada por uma área seca (configurando a condição de oásis), a importância relativa da radiação líquida decresce e em adição a esta radiação tem-se a advecção, que poderá contribuir no processo evaporativo com energia até maior que a radiação líquida disponível para a área úmida, aumentando assim a influência relativa da velocidade do vento e da umidade na evaporação.

A atmosfera é a camada gasosa que envolve a Terra sendo constituída por ar seco, vapor de água e particulados. A porção seca é a mistura de vários gases (nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono, hélio, hidrogênio e ozônio), sendo que as mudanças na composição da atmosfera podem gerar aumento da temperatura, o que interfere diretamente no processo de evaporação. A evaporação tem variação direta com a temperatura do ar à medida que um aumento na temperatura permite uma maior quantidade de vapor de água num mesmo volume de ar que atingiu o grau de saturação.

A presença do vapor de água na atmosfera define o seu grau de saturação, expresso como uma parte percentual da pressão de saturação e chamado de umidade relativa. Essa umidade vai determinar a demanda evaporativa da atmosfera, ou seja, a quantidade de água necessária para, através do processo de evaporação, ser capaz de saturar essa camada gasosa (WANIELISTA; KERSTEN; EAGLIN, 1997). A umidade atmosférica é a fonte das precipitações e a controladora das taxas de evaporação do solo e reservatórios, como também da transpiração dos vegetais.

A pressão atmosférica é outro parâmetro meteorológico que influencia o processo da evaporação, sendo que a evaporação é proporcional à diferença entre a pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície e a pressão de vapor numa altura acima desta superfície.

A evaporação recebe, também, influência da superfície evaporante, por meio da temperatura da camada superior, do albedo e da rugosidade. Entende-se por albedo a parcela da radiação solar refletida pela superfície, que, para a superfície de água, oscila entre 0,05 e 0,15, sendo o limite superior para água turva. Assim, quanto maior for o albedo, menor será a evaporação (MOLLE, 1989).

Já em relação à salinidade tem-se que um acréscimo na massa salina diminui a evaporação em igual percentual tendo em vista a grande afinidade do sal pela água e conseqüente diminuição da energia livre das moléculas da água. A evaporação da água do mar tem sido estimada cerca de 2 a 3% menor do que a água doce, quando as condições das outras variáveis de influência do processo de evaporação são as mesmas (LINSLEY; KOHLER; PAULHUS, 1958).

## 2.1 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

Uma vez que a evaporação envolve transporte simultâneo de massa e energia, sua estimativa pode ser realizada a partir de dois procedimentos amplamente conhecidos e tem como princípio a estimativa da evaporação a partir de dados climatológicos. O primeiro é conhecido como **método de transferência de massa**, que determina a relação do fenômeno estudado com a pressão de vapor. O segundo é o **método do balanço de energia**, que considera as entradas de energia solar e térmica e as saídas de fluxo de calor por condução, por evaporação e radiação.

### 2.1.1 Lei de Dalton

A quantificação das taxas de evaporação teve início com Dalton, em 1802, que relacionou a evaporação com a pressão de vapor, configurando a lei que rege os métodos de transferência de massa. Ao longo dos anos esta lei serviu como base para o desenvolvimento de diversos métodos.

Com o avanço dos estudos foram identificadas as demais variáveis que interferem no processo e embutidas na fórmula de Dalton. Essa formulação não leva em conta o fator energético integrante do processo evaporativo e expressa a evaporação em função da diferença entre a pressão parcial de saturação do vapor d'água na temperatura da superfície e a pressão parcial do vapor d'água numa altura acima da superfície.

Posteriormente foi introduzido o efeito do vento, como exemplo tem-se a equação proposta por Thorntwaite e Holzman, em 1939, um método de transferência de massa que determina a evaporação em função da densidade do ar, da velocidade de vento a 2 e 8 metros acima da superfície evaporante, da pressão de vapor d'água nas mesmas alturas anteriores e da pressão atmosférica, sendo aplicada para o caso de superfície sem vegetação (VILLA NOVA; REICHARDT, 1989).

### 2.1.2 Razão de Bowen

Em 1926, Bowen correlacionou o clima e a perda de água de uma superfície evaporante, determinando a relação entre o fluxo de calor sensível (H), energia utilizada para aquecer o ar, e de calor latente de evaporação emitidos por uma superfície evaporante. O calor latente de evaporação da água (LE) é a quantidade de energia requerida para a evaporação de 1 kg de água líquida, a uma dada temperatura (BRUTSAERT, 1982).

Cada grama de água evaporada consome 600 calorias (cal) de energia a uma temperatura de 0 K e 540 cal a 100 K. Como a dependência do calor latente com a temperatura tem uma

amplitude de variação pequena, em geral, para as temperaturas ambientais normais, o calor latente de evaporação é admitido como sendo igual a 590 cal /g (ANDRADE; MATTOS, 2000).

Bowen admitiu que existe similaridade nos transportes de calor e vapor, logo considerou os coeficientes de transporte iguais (VILLELA; MATTOS, 1975). A razão de Bowen fica então em função do gradiente de tensão de vapor e de temperatura observados acima da superfície (BRUTSAERT, 1982).

Segundo Novaes e Bignell (1993) no balanço de energia para regiões úmidas a evapotranspiração é responsável por mais de 80% da radiação líquida. Por outro lado em ambiente árido o calor sensível é responsável por mais de 80% da energia disponível, devido as altas temperaturas do ar. Desse modo tem-se que a razão de Bowen é geralmente maior que 1 em superfícies secas e muito menor que 1 sobre superfícies úmidas ou saturadas.

### 2.1.3 Balanço de Energia

A obtenção da evaporação sobre um lago pelo método do Balanço de Energia, conceitualmente, é de simples aplicação, ou seja, para um dado sistema durante um determinado tempo o ganho de energia menos a perda deve ser igual ao armazenamento. O balanço de energia para um reservatório ao longo de um período determinado de tempo é obtido por:

$$W_F = W_I + F_a \cdot \Delta t - F_e \cdot \Delta t - (L E + H) \cdot \Delta t + R_l \cdot \Delta t + G \cdot \Delta t \quad (1)$$

onde  $W_F$  e  $W_I$  são a energia interna do lago no final e no início do período analisado;  $F_e$  e  $F_a$  são os fluxos de calor advectado para e da água do lago pelas vazões;  $H$  é o fluxo de calor sensível;  $LE$  é o fluxo de calor latente transportado para a atmosfera devido a evaporação, sendo  $L$  o calor latente e  $E$  o fluxo de vapor d'água para a atmosfera;  $R_l$  é a radiação líquida;  $G$  é o fluxo de calor através do fundo do lago e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo analisado.



Para a definição da energia armazenada (W) basta que se defina o perfil de temperatura no período desejado em vários pontos do lago. Já para a energia adveccionada (F) deve ser conhecida a temperatura das vazões afluentes e efluentes do reservatório a cada intervalo de tempo definido. Entretanto tais medidas não são comuns, prejudicando a aplicação desse balanço para lagos profundos, onde são apresentados padrões sazonais de evaporação diferentes de um lago raso.

O fator mais significativo que influencia as diferenças na taxa de evaporação sazonal é a quantidade de calor que um lago profundo é capaz de armazenar e liberar gradativamente. Segundo Sacks, Lee e Radell (1994) e Dias (1986), em um lago profundo a evaporação tem comportamento retardado, ou seja, no inverno e na primavera as taxas de evaporação são menores em um lago profundo que num lago raso, porque a energia proveniente da radiação solar está sendo preferencialmente armazenada dentro do lago, servindo primeiro para aquecer a água e depois usada para o processo da evaporação. No outono, as taxas de evaporação são maiores no lago profundo porque a energia está sendo liberada pelo armazenamento, ou seja, apesar da diminuição da radiação incidente, o resfriamento das águas do lago fornece energia adicional para manter a evaporação mais alta. É observado então que o lago profundo tem um padrão retardado de um ou mais meses da evaporação do lago raso. Dessa forma, entender a estrutura térmica do lago é fundamental para determinar a evaporação de um período mais curto que o anual.

Quando a temperatura de entrada e de saída da água não são tão diferentes e o volume de entrada não é grande, comparado a capacidade de armazenamento do reservatório, o calor advechado pode ser desprezado; o fluxo de calor através do fundo do lago é usualmente desprezado (ASSOULINE; MAHER, 1993; REIS; DIAS, 1998; SIMON; MERO, 1985).

#### 2.1.4 Método de Penman

O primeiro tratamento físico adequado, na tentativa de estimar a evaporação em superfícies naturais, foi feito por Penman, em 1948, na Inglaterra. Essa abordagem pertence à categoria dos chamados **métodos combinados**, que envolvem considerações teóricas decorrentes dos métodos de transferência de massa e do balanço de energia radiante, levando a um sistema de duas equações com a evaporação e a temperatura como incógnitas.

Segundo Dias (1986), a solução proposta por Penman para estimativa da evaporação incorpora a aproximação de considerar a temperatura do ar igual a temperatura da superfície, o que tornaria seu uso inadequado na medida que essa diferença aumente.

Nesse método Penman considera o termo energético responsável por cerca de 80% do processo, cabendo o restante para o termo aerodinâmico (relativo a transferência de massa). Sendo assim, para regiões que apresentam as condições de oásis, o ajuste fica deficiente (DIAS, 1986; SACKS; LEE; RADELL., 1994). Para regiões áridas o processo de advecção pode superar a importância da energia radiativa, o que tem como consequência a forte dependência do processo da evaporação com as condições das áreas vizinhas (MOLLE, 1989).

Ainda no que se refere à utilização do método de Penman, tem-se que este vem sendo utilizado em vários estudos pelo mundo apresentando resultados satisfatórios, a exemplo da estimativa de evaporação média mensal em quatro lagos da Austrália em diferentes regiões climáticas inclusive o semi-árido, apresentado por Vardavas e Fountoulakis (1996). Entretanto, deve-se salientar que a preocupação na obtenção de dados observados deve ser constante, já que essa metodologia apesar de ser a mais recomendada para a região pode não se adequar a determinado lugar, como ocorre com o açude de Flocos em Pernambuco, segundo os estudos de Silva (2000).

Vardavas e Fountoulakis (1996) ainda destacam a dificuldade de se medir os fluxos de radiação na superfície líquida do reservatório e o custo elevado dos equipamentos necessários para a aplicação mais criteriosa do método.

### **2.1.5 Método de Priestley e Taylor**

Depois do método de Penman, muitas fórmulas foram sugeridas sendo algumas modificações propostas para a equação de Penman. Priestley e Taylor (apud DIAS, 1986) excluíram o termo aerodinâmico do método de Penman, com a vantagem de dispensar medidas de pressão de vapor sobre a superfície evaporante, de modo que a evaporação passa a ser estimada exclusivamente com o conhecimento da radiação líquida e da temperatura da superfície.

A fórmula apresentada por Priestley e Taylor tem como base o conceito de Evaporação de Equilíbrio introduzida por Slayter e Mollroy (apud BRUTSAERT, 1982), a partir da observação de que quando o ar sobre uma superfície úmida se torna saturado, a pressão parcial de saturação do vapor d'água na temperatura da superfície é igual à pressão parcial do vapor d'água numa altura acima desta superfície. Essa abordagem tem como vantagem a dispensa de medidas de pressão de vapor sobre a superfície do lago de modo que a evaporação pode ser estimada exclusivamente com o conhecimento da radiação líquida atingindo a superfície e da temperatura da superfície.

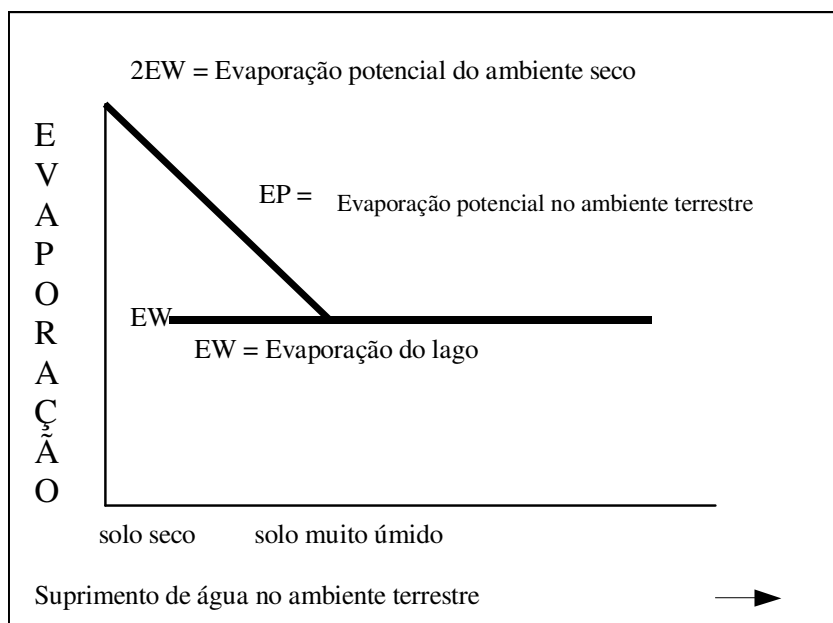
Segundo Dias (1986), como na prática a atmosfera sobre uma superfície úmida, tal como lagos e oceanos, raramente fica saturada, a equação que leva esse conceito tende a subestimar a evaporação em lagos.

### **2.1.6 Método de Morton – Relação complementar**

Devido ao conhecimento que os lagos criam seus próprios ambientes, com características diferentes do ambiente terrestre, e quanto mais árida é a região maior é essa diferença, surge,

com Bouchet apud Roque e Sansigolo (2001), a hipótese de que variações da evaporação potencial e a evaporação do lago são complementares, devido as variações da disponibilidade de água. Uma racionalização conceitual e revisão sobre o assunto foram realizadas por Morton (1983a), que apresenta evidências experimentais indicando ser esta uma hipótese de trabalho plausível.

Esse conceito de relação complementar entre a evaporação potencial e a do lago é baseada na interação entre a superfície evaporante e o ar circulando no ambiente, ou seja, a relação complementar considera que a evaporação potencial num ambiente terrestre completamente seco seria duas vezes a evaporação do lago, e que decresceria à medida que o suprimento de água no solo aumentasse até um valor mínimo igual a evaporação do lago, conforme mostra a **Figura 2** (MORTON, 1983b).



**Figura 2: Representação esquemática da relação complementar (MORTON, 1983a)**

Este método prevê estimativas de evaporação a partir de medidas rotineiras de temperatura, umidade e radiação global, numa tentativa de eliminar o conhecimento destas variáveis do

ambiente do lago. Isso ocorre desde que o lago seja definido como suficientemente largo e que os efeitos das transições ocorridas nas bordas sejam desprezadas. A evaporação é independente das variações no suprimento de água para a interação solo-planta do ambiente terrestre (MORTON, 1983a).

Quando não existe disponibilidade de água e o ar é quente e seco a evaporação potencial atinge o seu valor máximo. Se o suprimento de água aumenta e a evaporação real começa a ocorrer o ar torna-se mais frio e úmido, que gera por sua vez uma diminuição equivalente na evaporação potencial. Finalmente quando a disponibilidade de água sofre um aumento significativo a evaporação potencial converge para a evaporação do lago.

Todos os parâmetros citados pelo autor foram obtidos por meio de uma calibração envolvendo estimativas de balanço hídrico da evaporação mensal de dez lagos diferentes nos Estados Unidos e Canadá. Os resultados mostraram uma perfeita concordância entre o método conceitual da relação complementar e balanços hídricos, com erros inferiores a 10%. O modelo proposto por Morton é o único que permite calcular evaporação em lagos, usando dados medidos em terra, sem incorrer em nenhuma espécie de erro conceitual.

A equação para estimativa da evaporação do lago proposta por Morton é uma abordagem numérica que combina os conceitos de transferência de massa e balanço de energia com o conceito de *temperatura de equilíbrio* ( $T_p$ ), substituindo a temperatura real da água ( $T_s$ ).

Dessa forma, Morton (1983b) estima a evaporação de lagos usando uma modificação da equação de Priestley e Taylor que visa incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície nos balanços de ondas longas e nas taxas de variação das pressões de saturação do vapor d'água com a temperatura.

Roque e Sansigolo (2001) concluíram que o modelo conceitual de Morton (1983a) baseado na relação complementar fornece estimativas mais realistas e consistentes de evaporação de

lagos, principalmente em regiões mais secas. Além de esse modelo permitir prever, a partir de séries de dados climatológicos convencionais, qual seria o impacto ambiental de grandes lagos projetados no microclima de uma dada região.

Uma das objeções ao método de Morton é a desconsideração dos efeitos da velocidade de vento na evaporação do lago. Morton (1983a) explica que isso se deve aos seguintes fatores:

1. o vapor é transportado para fora do lago numa direção vertical pela turbulência do vento e do calor. A turbulência provocada pelo calor tem preponderância sobre as turbulências provocadas pelo vento para altas taxas de evaporação e se tornam mais pronunciadas quando há ocorrência de ventos fracos;
2. os efeitos na evaporação pelo aumento na velocidade do vento são particularmente compensados pelos efeitos resultantes da diminuição na temperatura da superfície da água;
3. as observações da velocidade do vento em terra são extremamente sensíveis ao peso do instrumento, rugosidade da superfície e obstruções vizinhas, o que não possibilita uma boa estimativa da velocidade do vento para o ambiente do lago. Desta forma o uso de observações rotineiras de velocidade de vento em terra pode gerar erros significantes.

### **2.1.7 Balanço Hídrico**

A determinação da evaporação em reservatórios referente a realização do balanço hídrico neste manancial tem como base a equação da continuidade, considerando volumes de entrada e saída ao longo de um intervalo de tempo

O método de determinação pelo balanço hídrico ou conservação de massa fica também munido de elevado grau de incerteza já que a evaporação é obtida como termo residual, computando-se todas as recargas e perdas do sistema.

Erros cometidos na medição dos termos do balanço hídrico, como vazão afluente e efluente, volumes armazenados inicial e final, vazões subterrâneas e a precipitação no lago, somam-se, aumentando a incerteza sobre a evaporação. Se as perdas por evaporação não são bem definidas, o volume evaporado não apresenta exatidão satisfatória (DIAS, 1986; VAREJÃO-SILVA, 2001; VILLA NOVA; REICHARDT, 1989). Ainda segundo Dias (1986), não se deve esperar resultados razoáveis para intervalos de tempo menores que um mês.

O volume armazenado depende da qualidade da curva cota X área X volume, ou seja, da precisão do levantamento topográfico da área alagada e do espaçamento das curvas de nível. Cabe observar que a validade de uma curva cota X volume deve ser revista periodicamente, uma vez que, devido à sedimentação, acomodação das margens e deslizamento de encostas ocorrem mudanças na forma do fundo do reservatório.

A vazão afluente também pode embutir erros nas estimativas da evaporação por meio da qualidade das medidas de nível nas calhas do rio a jusante do reservatório e transformação cota-vazão (calibração da curva-chave da seção do tributário), ou ainda por falta de medição de todos os tributários à seção de medição. Algumas vazões podem ter contribuição pequena, de pouca importância relativamente, mas dependendo da região pode apresentar picos de contribuição em algum período do ano.

Para a utilização desse método, então, é necessária a avaliação da representatividade da contribuição de todos os tributários. Uma alternativa apresentada por Dias (1986) é procurar correlacionar as vazões não medidas com as medidas quando essas apresentarem homogeneidade hidrológica.

De acordo com UNESCO (apud DIAS, 1986), os dados fluviométricos terão precisão suficiente se os erros introduzidos pela medição forem da ordem de 5%.

As vazões efluentes de um reservatório podem ser referentes a: água vertida, as retiradas do reservatório para atendimento às demandas, ou ainda, no caso de usinas hidrelétricas, as vazões turbinadas. Essas vazões geralmente são de mais fácil determinação, podendo ocorrer também as medições em conjunto por um posto a jusante do reservatório.

Já as vazões subterrâneas são certamente os termos mais difíceis de medição no balanço hídrico, sendo estes geralmente desprezados. Segundo Dias (1986) seu conhecimento exige numerosas medidas de nível do lençol freático e de permeabilidade do solo.

O método do balanço hídrico apresenta mais uma vez possibilidades de erros num termo importante de sua determinação, já que medições diretas de chuva sobre os reservatórios são raras. A depender do tipo de chuva comum à região e do tamanho do lago, a precipitação sobre o lago pode ser significativamente inferior à ocorrida em terra, devido a diferença de armazenamento térmico do solo e da água. Um lago suficientemente grande para criar um microclima localizado em uma região com predominância de chuvas convectivas apresenta essa tendência.

Conforme explicitado por Dias (1986), um reservatório apresenta grande capacidade de armazenamento térmico das águas, refletindo-se diretamente em diferenças entre o padrão sazonal da temperatura do ar em terra e da temperatura da água. No verão as águas tendem a permanecer mais frias que o ar, ocorrendo o oposto no inverno. Dessa forma durante o verão a temperatura da água mais fria tende a causar uma inversão térmica na camada limite água-atmosfera, reduzindo o transporte de calor e vapor d'água do lago para a atmosfera por convecção. O resultado é que em regiões onde as chuvas convectivas são dominantes, como o caso do Norte/Nordeste, as diferenças acima descritas são maiores, enquanto que para a predominância de chuvas frontais, como é o caso do Sul/Sudeste, essas diferenças são mínimas ou até inexistentes.



A medida direta do volume evaporado por diferença de nível da superfície evaporante apresenta a desvantagem da ocorrência de ondas que dificultam a medição exata da variação de nível d'água, que se tornam maiores com o aumento da superfície. Outro fator é que essa variação não ocorre apenas pela evaporação. Em geral há fluxo de água subterrânea, que pode estar contribuindo ou retirando água do volume total reservado, causado por movimento de água no solo circunjacente ao reservatório e que é difícil de determinar (VAREJÃO-SILVA, 2001).

A aplicação direta dos dados de nível pressupõe que a superfície seja plana e horizontal, o que não ocorre em grandes superfícies alagadas devido a ação do vento e efeito do remanso que pode provocar desníveis consideráveis e conseqüentemente introduzir até mesmo erros grosseiros, sendo então necessária a medição do nível em diversos pontos do reservatório (DIAS, 1986).

### **2.1.8 Evaporímetros**

Com relação aos equipamentos de medição de evaporação, os chamados evaporímetros, pode-se destacar como os mais conhecidos os tanques de evaporação e os atmômetros.

Os tanques de evaporação aparecem na literatura com grande diversidade de aplicação, podendo ser enterrados, superficiais, fixos e flutuantes, com os mais diversos tamanhos, sendo o mais conhecido e encontrado o chamado Tanque Classe A. Esse tanque apresenta baixo custo de implantação e facilidade de operação, consistindo num tanque cilíndrico padronizado de ferro galvanizado, com 120,6 cm de diâmetro e 25,4 cm de altura, disposto na superfície, que possibilita a medição da evaporação por meio das mudanças do nível da água. Cada tanque evaporimétrico dispõe de três acessórios: um poço tranquilizador para evitar a formação de ondulação pronunciada na superfície da água, onde é feita a leitura; um micrometro para aferir o nível da água do tanque, estando apoiado na borda superior do

tanque tranquilizador; e o anemômetro totalizador, colocado a 50 cm de altura em relação a superfície do solo e fixo no estrado de madeira no qual o tanque deve estar apoiado para não receber influência da temperatura do solo (TUCCI; BELTRAME, 2000).

Para a estimativa da evaporação de um reservatório a partir da leitura do tanque supõe-se a obtenção da evaporação do reservatório a partir da aplicação de um coeficiente de passagem, em geral menor que 1 e valor médio próximo a 0,7, como correção da medida obtida no tanque. Essa correlação deve ser feita experimentalmente, pois depende das características do reservatório.

Os atmômetros são equipamentos que dispõem de um recipiente de água conectado a uma placa porosa, de onde ocorre a evaporação. O mais conhecido é o de Piche, que consiste em um tubo de vidro com 11 cm e discos planos horizontais de papel de filtro com 3,2 cm de diâmetro. A evaporação ocorre nas duas faces do papel de filtro (TUCCI; BELTRAME, 2000).

### **2.1.9 Comparação entre os métodos**

O estudo de Vallet-Coulomb (2001) realizado em lagos rasos na África Tropical compara três métodos de estimativa da evaporação: o balanço energético, o método de Penman e o modelo CRLE (Complementary Relationship Lake Evaporation Model), proposto por Morton (1983a), fazendo uma análise de sensibilidade das variáveis de entrada desses métodos, o que resultou numa avaliação de consistência nos valores encontrados para taxas de evaporação anual, com erros acumulados variando entre 10 e 20% a depender da imprecisão de medidas das variáveis climáticas, sendo que o método de Penman apresentou os resultados mais vulneráveis a essa análise.

No Brasil, Dias (1986) comparou, no período de 1979 a 1982, os valores de evaporação estimados por diferentes métodos com base em dados climatológicos e medidas obtidas em

Tanque Classe A no reservatório de Sobradinho, no rio São Francisco. O autor concluiu que o método proposto por Morton foi o que apresentou resultados mais uniformes, regionalmente coerentes e consistentes, para as três estações meteorológicas consideradas no estudo.

Andrade e Mattos (2000) compararam os resultados dos métodos de Penman, Morton, Priestley e Taylor e Balanço de Energia Simplificado aplicados à Lagoa do Bonfim, Rio Grande do Norte, concluindo que o modelo conceitual de Morton foi o que apresentou melhores resultados.

Roque e Sansigolo (2001) compararam as estimativas mensais de evaporação do lago de Taquaraçu, São Paulo, calculadas pelo modelo de Morton, com as obtidas pelo método de Penman e medidas de Tanque Classe A no local. O modelo de Morton superestimou as taxas de evaporação do lago obtidas pelo método de Penman no outono e no inverno e subestimou as taxas na primavera e verão. Em relação ao Tanque Classe A o autor concluiu que as medidas foram em média 14% superiores às estimativas pelo método de Morton, levando a um coeficiente do tanque de 0,86. Foi concluído que o modelo de Morton forneceu estimativas mais realistas e consistentes.

#### **2.1.10 Disponibilidade de dados**

A determinação desse fenômeno ainda demonstra elevado grau de incerteza devido à complexidade do processo de evaporação, forte dependência de diversas variáveis muitas vezes de difícil medição.

Nessa análise dos variados métodos deve-se observar que os grandes reservatórios geralmente têm estações climáticas em sua vizinhança, que, no entanto, nem sempre representam as condições da atmosfera sobre o lago; e muitas vezes podem estar mal equipadas.

As informações utilizadas para o cálculo da evaporação disponíveis dizem respeito a dados climatológicos medidos em terra e observações de evaporímetros, entretanto esses dados não

retratam as mudanças sazonais no armazenamento de energia na subsuperfície dos lagos. Para uma análise anual os erros devido a utilização de dados medidos em terra não são significantes, sendo aceitável para fins de planejamento, gestão e estudos de impacto ambiental (MORTON, 1983a).

Em relação à medição de dados em terra tem-se que esses dados são influenciados significativamente por mudanças na disponibilidade de água para evapotranspiração de áreas adjacentes, e são, portanto, não representativas do ambiente do lago (MORTON, 1983a).

Na realização do balanço hídrico, a ausência de vazões afluentes ao reservatório é um fator comum de ocorrer, principalmente nos primeiros anos de instalação das seções de controle, pois necessitam de calibração para construção da curva-chave da seção, que relaciona os níveis de água com as vazões correspondentes. Para sanar esse problema é comum o desenvolvimento de técnicas computacionais que possibilitem a geração de séries de vazão a partir do conhecimento do volume precipitado e das características do escoamento.

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROCLIMÁTICA DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO

O clima da região semi-árida é caracterizado pela insuficiência de chuvas e pela extrema irregularidade quanto à sua distribuição temporal. Essas chuvas são concentradas em uma única estação, com cerca de 90% dos totais anuais acontecendo em seis meses e uma variação em torno de 30% dos totais pluviométricos anuais.

Segundo Molle (1989), na bacia de Sumé, no Estado do Ceará, o total precipitado no ano de 1983 foi apenas de 248 mm, enquanto que o de 1985 atingiu 1438 mm.

Essa irregularidade e a deficiência pluviométrica da região tão comum no Nordeste, apesar das regiões equatoriais gozarem da abundância das precipitações, podem ser explicadas pela

sua localização, quando analisada a circulação atmosférica das massas de ar e o relevo. Essa região apresenta-se como ponto de encontro das massas de ar, exceto da Tropical Continental.

No verão, ocorre a influência da Massa Equatorial Continental, que provoca chuvas convectivas pelo aquecimento da base dessa massa e ascensão atmosférica do ar quente. Esse tipo de chuva é, geralmente, chuva de grande intensidade e de pequena duração, restrita a áreas pequenas. São precipitações que podem provocar importantes inundações em pequenas bacias, entretanto cabe ressaltar que essa massa apresenta perda de umidade no seu deslocamento, e essas perdas vão determinando a quantidade de chuva local (QUADRO, 2002).

No inverno, a massa Polar Atlântica alcança o litoral do Nordeste, onde, encontrando a massa Tropical Atlântica, provoca as chuvas frontais, resultado da condensação do ar quente quando em contato com o ar frio da massa polar, apesar de na altura do Estado da Bahia já ter perdido bastante intensidade, dissipando as frentes frias. Além disso, a massa Tropical Atlântica perde muito de sua umidade nas regiões serranas próxima ao litoral. Quando ocorrem, são chuvas com maior duração, atingindo áreas maiores com baixa intensidade (QUADRO, 2002).

Cabe ressaltar, entretanto, que, dada a grande variabilidade nos regimes de precipitação para diferentes regiões do Nordeste, identifica-se mais um mecanismo responsável pela distribuição espacial e temporal da chuva nessa região: estando localizada na fronteira entre os hemisférios Norte e Sul e apresentando uma largura entre 3 e 5 graus em torno do globo, próxima à superfície, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos sistemas meteorológicos que mais influenciam nesse regime pluviométrico, explicando o fato dessa região não gozar da abundância de chuvas comuns nas regiões equatoriais (SAMPAIO; CASTRO; TOMASELLA, 2002). Quando a ZCIT se desloca mais ao sul, tem-se maior quantidade de chuva na área influenciada.

Outro mecanismo importante é dos vórtices ciclônicos, que penetram no Nordeste geralmente próximo à cidade de Salvador e são caracterizados pela nebulosidade nas bordas e ausência na sua região central. Estes vórtices formam-se no Oceano Atlântico Tropical Sul entre os meses de setembro e abril e ocorrem em maior número nos meses do verão, especialmente em janeiro, provocando os períodos de estiagens na região central (litoral) do vórtices ciclônicos nesse mês, e contribuindo com as chuvas no interior do Estado da Bahia que corresponde a extremidade do mecanismo (SAMPAIO; CASTRO; TOMASELLA, 2002).

O fenômeno do El Niño também configura um mecanismo associado à seca do Nordeste através do mecanismo de circulação da atmosfera e conseqüente influenciador do clima da região. Este fenômeno é definido pelo aparecimento de águas superficiais com temperatura acima do normal no Pacífico Equatorial Central e Leste, que acarreta forte convecção com movimentos ascendentes e formação de nuvens. Entretanto em regiões como o Nordeste Brasileiro o que ocorre é a inibição da convecção e conseqüentemente da formação de nuvens. Os efeitos desse fenômeno são sentidos nos cinco primeiros meses do ano, exatamente o período de maior ocorrência de chuva. O fenômeno oposto ao anterior, La Niña, determina chuvas acima da média nessa região, a depender das condições do Atlântico (SAMPAIO; CASTRO; TOMASELLA, 2002).

Segundo Cadier (1994) a isoietal de 800 mm delimita uma superfície de 950.000 km<sup>2</sup>, a qual corresponde ao Polígono das Secas, cobrindo 60% da região nordeste. Apenas 2% do Polígono das Secas recebe pluviometria inferior a 400 mm. Tratam-se de regiões onde a fraqueza das precipitações é agravada por efeito de interceptação das massa de ar pelo relevo. 25% desse polígono tem pluviometria anual média inferior a 600 mm. No interior há várias áreas com pluviometria superior a 800 mm, tratando-se em geral de um microclima de altitude.

O clima semi-árido do nordeste se caracteriza por temperaturas médias anuais elevadas (23 a 27°C) variando pouco de uma região para outra, com amplitudes térmicas diárias em torno de 10°C, mensal de 5 a 10°C e anual de 5° a 2° C; média anual de insolação de 2800 h/ano; umidade relativa com médias anuais em torno de 70-80% no litoral, nas serras e no Maranhão, decrescendo do litoral para o interior onde atinge valores de 50 a 60%.

Em relação a evaporação tem-se uma variação de 1000 mm/ano no litoral da Bahia a Recife, atingindo 2000 mm/ano no interior, sendo que na área de Petrolina (Pernambuco) chega a 3000 mm/ano. Esses dados estão confirmados por Molle (1989) em pesquisa realizada com base em dados de 11 postos distribuídos no semi-árido e séries variando entre 8 a 25 anos, nas quais a evaporação média anual medida em Tanque Classe A varia entre 2695 a 3341 mm, onde os valores mais elevados ocorrem nos meses de outubro a dezembro, e mínimos, de abril a junho.

Outra característica típica dessa região é a intermitência dos cursos d'água. Segundo Vieira (2003), todas as grandes bacias que constituem a região Nordeste têm rios intermitentes, a exceção das bacias do São Francisco e do Parnaíba, além de apresentarem vazões naturais com elevado coeficiente de variação. Campos (apud VIEIRA, 2003) apresenta um coeficiente em torno de 1,4 como valor médio para o Semi-árido.

Todo esse cenário apresenta uma alta frequência de períodos secos, fazendo com que a região enfrente situações de calamidade por causa das secas. As estatísticas das grandes secas ocorridas no Nordeste indicam 30% de anos secos no século XVIII, 16% de anos secos no século XIX e 23% de anos secos no século XX (SUDENE apud VIEIRA 2003).

As bacias de rios intermitentes são classificadas como fortemente vulneráveis, predispostas a situações críticas, segundo Vieira (2003), que utiliza como parâmetros a intermitência dos rios e a relação entre o Déficit de Evapotranspiração Potencial (diferença entre a evapotranspiração real e potencial) e a precipitação média, chamado de Déficit de

Evapotranspiração Potencial Relativa – DETPR. Quando o DETPR for maior que 1, as bacias apresentam alta vulnerabilidade natural.

No estudo realizado por Vieira, em 1999, (apud VIEIRA, 2002) para classificação de áreas críticas no semi-árido nordestino, das 24 bacias hidrográficas do Nordeste, oito bacias foram consideradas críticas quanto à disponibilidade hídrica, duas bacias foram consideradas críticas quanto a potencialidade hídrica, quinze bacias foram consideradas críticas quanto a qualidade da água, e dez bacias foram consideradas críticas quanto ao armazenamento estratégico.

O atendimento das demandas torna-se um problema crucial em face de ocorrência de secas periódicas e a intermitência dos escoamentos superficiais. Por outro lado às garantias necessárias ao fornecimento de água, para essas demandas, são bastante diferenciadas e a regularização de vazões se dá basicamente através de reservatórios de acumulação, a custo de elevada perda de água por evaporação.

De acordo com a SRH/CE (apud VIEIRA, 2003), o rendimento hídrico dos reservatórios de acumulação é bastante baixo, com valores próximos a 25% devido às altas taxas de evaporação. Isso significa que o volume regularizado anual corresponde a cerca de ¼ da capacidade do reservatório, para os açudes de pequeno e médio porte.

### 2.3 EXPERIÊNCIAS DE ESTIMATIVAS DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS

Os estudos realizados em reservatórios no semi-árido confirmam a relevância da determinação das taxas de evaporação para o melhor aproveitamento das águas acumuladas a fim de atender as demandas de água.

As perdas por evaporação vêm sendo objeto de estudo prioritariamente nos grandes reservatórios, construídos com finalidade de abastecimento da população, irrigação, geração



de energia e piscicultura, apresentando significativo volume acumulado, sujeito ao fenômeno estudado.

Guilhon (1998) revela a existência no setor elétrico de catorze aproveitamentos em operação no Brasil que apresentam significativa vazão evaporada, representando mais que 1% da vazão afluyente, tanto no período crítico como nos valores médios. Dentre estas, três estão localizadas no Nordeste, merecendo destaque o lago de Sobradinho, onde ocorre maior influência da evaporação. O percentual da vazão evaporada em relação à vazão afluyente determinado para esse aproveitamento supera 7%, o que representa uma vazão evaporada de 200 m<sup>3</sup>/s para uma vazão afluyente média de 2.673 m<sup>3</sup>/s. O barramento Boa Esperança no Rio Parnaíba, que divide os estados do Maranhão e Piauí, apresenta o segundo maior percentual, na ordem de 3,9%, os outros aproveitamentos se aproximam de 1%, reforçando o cenário mais crítico inerente aos localizados na região do semi-árido e, por conseguinte, necessitando de maior atenção para controle dessas perdas.

Esses dados são confirmados pelo Sistema de Informação Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), que apresenta estimativa de evaporação líquida para as usinas em operação do Sistema Hidrelétrico Brasileiro, na qual o lago de Sobradinho, situado na bacia do Rio São Francisco na região do município de Petrolina, apresenta a maior taxa de evaporação (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2001).

No estudo realizado por Andrade e Mattos (2000) no sistema lacustre do Bonfim, composto por seis lagoas, dentre elas a do Bonfim, manancial responsável pelo abastecimento humano no Rio Grande do Norte, foi constatada, no verão de 2000, uma deficiência hídrica entre a precipitação e a evaporação que, se a recarga do sistema fosse feita apenas através das lagoas, os valores de evaporação encontrados inviabilizaria o abastecimento, ou pelo menos comprometeria.

Conforme estudo realizado por Lopes e Conejo (1987) em relação aos reservatórios localizados em região de altas taxas de evaporação, o dimensionamento desse projeto deve explorar e caracterizar regionalmente mais indicadores relativos à evaporação, como também o uso da simulação da operação de reservatórios para auxiliar no dimensionamento, com a fundamental inclusão das perdas ocasionadas pela evaporação após a criação do lago, pode levar a construção de reservatórios menores e mais eficientes.

Nesse contexto destaca-se, ainda, o estudo realizado pela SUDENE em conjunto com a Cooperação Francesa, que por meio da implantação de uma rede de estudos no semi-árido retratou o comportamento da evaporação em pequenos açudes dessa região confirmando as perdas elevadas de água, além de contribuir com parâmetros de estimativas dessa medida em Tanque Classe A e crítica aos valores propostos por Hargreaves, método de cálculo de evapotranspiração, que têm sido muito utilizados no Nordeste Brasileiro em projetos de irrigação pela sua fácil aplicação. Nesse método estão estimados valores de referência para 152 localidades em 9 estados nordestinos, dispostos em tabelas (STUDART, 1999).

Outra avaliação importante para a construção de reservatórios é a comparação entre a eficiência dos pequenos e grandes lagos quanto às perdas por evaporação para dar subsídio a escolha do tamanho adequado do reservatório a ser construído. Essa questão é abordada por Campos (2003) na análise da influência da evaporação em 40 reservatórios superficiais no Ceará. Os resultados desse estudo mostram que os grandes reservatórios apresentaram uma evaporação média de 7% do volume médio afluente anual, enquanto que os pequenos, apresentaram 18%. Desse modo o autor conclui que existe uma tendência dos grandes açudes serem mais eficientes do que os pequenos nesse contexto.

Fontes, Oliveira e Medeiros (2003) avaliaram a representatividade da evaporação em reservatórios do semi-árido para a gestão das águas, a partir da análise do comportamento de três reservatórios, localizados na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (Ba), sob efeito de altas

taxas de evaporação e baixos índices pluviométricos. A comparação entre a vazão regularizada e a vazão evaporada, devido à formação de um espelho d'água, mostra um comprometimento acentuado na disponibilidade hídrica da região, uma vez que a vazão evaporada chega a superar a vazão regularizada, além de apresentar um volume limite que a vazão regularizada diminui, mesmo com o aumento da água armazenada para o reservatório de São José do Jacuípe. Os resultados revelam que a quantificação detalhada da evaporação e análise de sua influência no comportamento de um reservatório localizado no semi-árido são critérios indispensáveis de decisão na escolha do local para construção de uma barragem, no dimensionamento de tal projeto e na adequação das regras de operação de um reservatório objetivando o manejo eficiente da água e sua conservação em qualidade e quantidade.

#### 2.4 BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO HIDROCLIMATOLÓGICO

A instalação de bacias experimentais compondo uma região homogênea permite a transferência de informações de um local para outro que apresente similaridade de comportamento. Assim a escassez de dados hidrológicos é combatida com a otimização das informações disponíveis, que associadas a ferramentas específicas conseguem subsidiar medidas de gestão de acordo com o comportamento hidroclimatológico regional em locais sem dados.

As primeiras bacias experimentais no Nordeste Brasileiro foram instaladas na década de 70, num trabalho pioneiro realizado através de uma cooperação técnica entre a SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – e a ORSTOM / França – Office de la Recherche Scientifique et Technique outre-Mer – quando foram instaladas 8 bacias com o objetivo de obtenção de dados para possibilitar a regionalização de lâminas escoadas (LIRA,

2003). Nesse trabalho merece destaque as bacias de Sumé, na Paraíba, e Tauá, no Ceará, que num esforço conjunto com universidades mantiveram os estudos. Para as demais bacias o projeto foi paralisado, não havendo mais iniciativas desse tipo de pesquisa na região.

Para resgatar a experiência desse projeto da SUDENE, vem sendo implantado atualmente o Projeto IBESA – Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido, objetivando entender melhor o balanço hidro-energético de bacias hidrográficas do Semi-árido, realizado pela Rede de Hidrologia do Semi-árido (REHISA). Essa Rede é formada por sete universidades da região (UFPB, UFCG, UFPE, UFRPE, UFRN, UFC e UFBA), visando desenvolver pesquisas conjuntas na hidrologia do semi-árido nordestino através de estudos realizados em sete bacias experimentais, aprimorando os conhecimentos teóricos e experimentais dessa região.

A operação de bacias experimentais está consolidada em países desenvolvidos apresentando várias experiências de estudos utilizando essa metodologia.

Ando, Musiake e Takahasi (1983) equiparam uma pequena bacia experimental em estado natural com área de 4,4 ha em Tama Hill, Tóquio, Japão. As medidas abrangeram dados de precipitação, evaporação, vazão, umidade do solo e níveis dos aquíferos. As informações obtidas foram utilizadas para elaboração de modelo hidrológico em escala horária e diária e avaliação de sua aplicação.

Ando, Musiake e Takahasi (1984) realizaram a mesma pesquisa anterior em uma bacia experimental urbanizada com área de 2,8 ha, também localizada em Tama Hill, Tóquio, Japão. Os resultados das duas pesquisas foram comparados para avaliação dos efeitos da urbanização nos processos hidrológicos.

Musiake, Oka e Koike (1988) estudou o comportamento da umidade do solo em zona insaturada para clima temperado a partir de observação de tensiômetros na bacia experimental em estado natural de Tama Hill, Tóquio, Japão.

Balek e Bursik (1989) realizou pesquisa referente a água subterrânea em uma área de 15 km<sup>2</sup>, onde 25 modelos hidrológicos conceituais foram aplicados. Foram monitorados variáveis climáticas, umidade do solo, nível dos lençóis freáticos, vazão e transpiração. Os resultados obtidos referem-se aos processos de recarga de aquíferos em geologia sedimentar.

Obled, Wendling e Beven (1994) avaliou a aplicação do modelo hidrológico distribuído TOPMODEL, testando o significado da densidade de monitoramento para estimativa da precipitação efetiva. Foram estudados cenários com 5 equipamentos e com 21 equipamentos de medição. Esse estudo foi realizado na bacia experimental Real Collobrier com 71 km<sup>2</sup> localizada na França.

Wood et al (1998) utilizou a bacia experimental do Rio Coweeta de 17 km<sup>2</sup> para investigação das Áreas Elementares Representativas do modelo hidrológico TOPMODEL.

Bent (2001) estudou os efeitos das atividades de desmatamento e aplicação de herbicida nos componentes do escoamento e na recarga de aquíferos para o reservatório de Quabbin que integra a bacia experimental Cadweel Creek, em Massachussets.

Borga, Fontana e Cazorzi (2002) utiliza a bacia experimental Cordon de 5 km<sup>2</sup> na Itália para testar modelo distribuído de previsão da distribuição espacial da saturação do solo em resposta a uma chuva de duração específica.

Gupta (2004) utilizou duas bacias experimentais nos EUA para demonstrar a utilização da ferramenta matemática de interpretação empírica dos parâmetros de escala utilizada para estudos da dinâmica dos escoamentos em canais.

Hudson (2004) discute os impactos dos sedimentos nas medidas de vazão em canais abertos de bacias experimentais do Reino Unido.

Na literatura pesquisada não aparece uma avaliação da adequação e viabilidade de estudos realizados em bacias experimentais como base de metodologia para estudos relacionados a

hidroclimatologia. É nesse contexto que se insere o presente trabalho, uma tentativa de discutir as vantagens que a utilização dessa unidade de pesquisa pode introduzir no estudo da evaporação em reservatórios na região semi-árida.

### 3 METODOLOGIA

Para avaliar as estimativas de evaporação em açudes de bacias hidrográficas da região semi-árida, a partir do uso de bacia experimental, visando subsidiar o manejo dos reservatórios em bacias da região semi-árida, é desenvolvida pesquisa experimental utilizando como estratégia a análise do comportamento desse fenômeno em uma pequena bacia, adequadamente monitorada, com características comuns à região de estudo para obtenção de resultados representativos para o clima semi-árido.

A presente pesquisa está dividida em três etapas. A primeira é a implantação da bacia experimental, englobando as atividades de seleção do local de implantação, reconhecimento da área e instrumentação hidroclimatológica da bacia. A segunda consta da estimativa da evaporação nos reservatórios a partir da aplicação dos dados observados nos métodos de estimativas desse fenômeno e análise dos dados observados em evaporímetro. Para finalizar, são analisadas as informações geradas através da: (i) avaliação das estimativas de evaporação, com a verificação da consistência dos dados obtidos, (ii) caracterização da evaporação no local de estudo e (iii) avaliação da adequação no uso de bacias hidrográficas como unidade de pesquisa no estudo da evaporação em açudes.

#### 3.1 IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL

Uma bacia experimental é uma região relativamente homogênea quanto ao solo, vegetação e características físicas, onde são efetuados estudos detalhados. Essas unidades hidrográficas representativas da região estudada permitem estudos controlados dos diversos processos inerentes à movimentação da água dentro do ciclo hidrológico e das inter-relações entre eles, funcionando como laboratório em campo para estudos referentes a bacias hidrográficas da região representada (PAIVA; PAIVA, 2001).

Segundo Toebe e Ouryvaev (1970) (apud PAIVA; PAIVA, (2001), essas bacias devem ter na ordem de 4 km<sup>2</sup> para facilidade dos estudos experimentais. Para Lira (2003) o tamanho das bacias experimentais deve ser de 1 a 15 km<sup>2</sup> a depender dos detalhes do estudo a ser realizado.

Segundo Ponce (1989) (apud PAIVA; PAIVA, 2001) uma pequena bacia apresenta as seguintes propriedades: a precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no tempo e no espaço sobre toda a bacia; a duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia; e os processos de armazenamentos e de fluxo concentrado na calha dos cursos d'água são pouco importantes. Essas propriedades refletem a vocação das pequenas bacias para serem estações experimentais.

### **3.1.1 Seleção do local de implantação**

A seleção do local de implantação assume importância primordial uma vez que resulta no grau de representatividade da área para o estudo. Dessa forma é feita uma caracterização da região avaliada e a determinação dos pontos relevantes que devem estar presentes na bacia experimental.

A caracterização da região envolve os aspectos físicos e climáticos, a partir de uma avaliação geral da pedologia, geologia, vegetação predominantes, do regime pluviométrico, do regime dos cursos d'água e da dinâmica climática.

É realizada uma planificação inicial que permita selecionar as pequenas bacias hidrográficas cujos comportamentos hidrológicos sejam susceptíveis de extrapolação para a região representada. A partir daí são feitas visitas às áreas pré-selecionadas para avaliação da viabilidade de implantação da bacia experimental. Os pontos analisados compreendem tanto a representatividade física e climática desejada, como aspectos logísticos a exemplo da distância entre a bacia e a unidade responsável pela pesquisa; da questão da propriedade dos terrenos inclusos na área de interesse, sendo preferencialmente indicada a escolha de



Unidades de Proteção Ambiental pela ausência dos efeitos antrópicos resultado do uso e ocupação do solo e segurança dos equipamentos instalados; e apoio das autoridades e comunidade local.

Os critérios de seleção da bacia experimental para a presente pesquisa são: (i) estar totalmente inserida no clima semi-árido, (ii) apresentar embasamento cristalino, caracterizado por solos rasos, aonde a rocha mãe chega a aflorar, determinando maiores escoamentos superficiais e baixa infiltração, já que essa característica é presente em cerca de 70% do semi-árido; (iii) apresentar a caatinga como vegetação predominante e (iv) englobar a área de drenagem de um açude com problemas de quantidade e qualidade da água, configurando a realidade da região em questão.

### **3.1.2 Reconhecimento da área**

Com a área de implantação da bacia definida, inicia-se o reconhecimento detalhado da área de estudo, que consiste na identificação dos açudes existentes, suas características topográficas, demandas requeridas, volume armazenado e acompanhamento do comportamento hidrológico durante o período estudado.

A caracterização agora da área detalhada envolve melhor precisão, com elaboração de mapas planialtimétricos, hidrografia e mapas pedológicos.

### **3.1.3 Instrumentação da bacia experimental**

As bacias experimentais são implementadas de acordo com os propósitos de investigação. Para o estudo da evaporação mede-se, se possível, todas as variáveis de influência desse fenômeno.

Para aquisição de dados referente as variáveis climatológicas é instalada uma estação meteorológica, local onde o observador faz a avaliação de um ou de diversos elementos meteorológicos em determinado momento da observação.

A identificação física das estações meteorológicas é feita por meio de sua posição geográfica expressa em latitude, longitude e altitude.

Um dos elementos fundamentais para o bom êxito da obtenção de dados da estação meteorológica é a uniformidade dos horários em que se fazem as observações. Isso vai permitir a comparação entre os dados da estação experimental e a rede de meteorologia oficial.

A qualidade e a confiabilidade das operações meteorológicas são propriedades que devem ser perseguidas pelo sistema de coleta de dados. Para atender a essas exigências, dois pressupostos tornam-se imperativos: a disponibilidade de recursos financeiros e a existência de pessoal técnico-operacional, quantitativa e qualitativamente adequados.

Essas estações podem ser do tipo convencional, reunindo os equipamentos apresentados em uma área estrategicamente selecionada, ou do tipo automática.

As estações convencionais são constituídas de equipamentos que necessitam da leitura dos dados por um observador treinado pelo menos duas vezes ao dia. Os equipamentos necessários são: abrigo meteorológico (ou termométrico), termômetro de máxima, termômetro de mínima, psicrômetro (medida de radiação solar global), pluviômetro (altura de chuva em mm), barômetro (medida de pressão atmosférica), catavento anemômetro e/ou anemógrafo (medida de velocidade do vento), evaporímetro de Piche, barógrafo (registra dados contínuos de pressão), termógrafo ou termohigrógrafo, higrógrafo (umidade do ar), pluviógrafo (medida contínua de chuva), heliógrafo (insolação), termômetro de solo (2, 5, 10, 20, 30 cm de profundidade) e atlas de nuvens.

As estações automáticas são aquelas estações nas quais os instrumentos efetuam, transmitem ou registram automaticamente as observações. Os sensores medem os parâmetros normais de uma estação meteorológica e os mais utilizados são:

- ✓ sensor de pressão atmosférica – Barômetro
- ✓ sensor de velocidade e direção do vento – Anemômetro;
- ✓ sensores de temperatura e umidade relativa do ar – Termômetro e Higrômetro – localizados dentro de um único invólucro, o qual garante que ambos estejam amostrando as mesmas condições.
- ✓ sensor de precipitação – Pluviógrafo - destinado a medir a precipitação (chuva) acumulada num intervalo de tempo.
- ✓ sensores de radiação solar global – Radiômetros (piranômetros, pireliógrafos)
- ✓ sensor de radiação total líquida ou saldo radiômetro - mede a diferença entre a radiação hemisférica total que vem do céu e nuvens e aquela que provém do solo. Suas medições de irradiância (em  $W.m^{-2}$ ) avaliam o saldo de radiação instantâneo na superfície terrestre.

Essas estações transmitem e/ou registram automaticamente as medidas de todos os sensores conectados a mesma, em intervalos de tempo regulares programados pelo usuário. Estes dados devem ser armazenados na memória da estação, podendo ser também transmitidos via satélite para o centro de coleta de dados.

A definição dos equipamentos instalados na bacia experimental depende do financiamento disponível para a aquisição destes, uma vez que a estação automática tem seu custo bastante elevado em relação à convencional, porém sua precisão é maior.

Para a elaboração do balanço hídrico de um reservatório todas as entradas e saídas de água são monitoradas. As vazões são medidas em seções de controle a montante e a jusante do reservatório onde são instaladas réguas linimétricas - réguas de alumínio com 1 metro devidamente graduada. Essas réguas podem estar instaladas na calha natural do rio ou num dispositivo de medição de vazão tipo Calha Parshall contruido no leito do rio. A calibração das seções na calha natural é a base da precisão das informações obtidas, sendo necessário vários eventos de chuva que provoque escoamento para que se possa ter várias medidas de vazão para diversos níveis de água na seção e possa-se fazer a relação entre nível d'água e vazão graficamente, a chamada curva chave da seção. No que se refere a construção de calha Parshall tem-se uma seção previamente calibrada de acordo com as dimensões de projeto desse dispositivo de medição.

Essas réguas são instaladas também nos reservatórios para leitura da variação dos níveis d'água.

Para o estudo da evaporação indica-se também a instalação do evaporímetro Tanque Classe A por ser um equipamento muito utilizado devido ao seu custo e facilidade de operação.

Para elaboração do balanço de energia do reservatório, determina-se o perfil de temperatura do manancial estudado para avaliação do armazenamento térmico.

#### **3.1.4 Escolha do local de instalação**

As avaliações de alguns elementos meteorológicos dependem da exposição dos instrumentos. Para que as observações sejam comparáveis com as estações mantidas por órgãos competentes, as exposições devem ser semelhantes. Recomenda-se então seguir o padrão das estações integrantes da Rede Meteorológica oficial.

Uma área de terreno cercado, coberta de grama curta, é satisfatória para os instrumentos externos, contanto que sejam convenientemente localizados. Os instrumentos devem estar

longe da ação imediata das árvores e construções altas e numa posição que garanta uma representação correta das condições de meio ambiente. A estação não deve, tanto quanto possível, estar localizada sobre ou próximo a margens de rios, ladeiras, cordilheiras, penhascos ou pequenos vales. Uma estação climatológica deve ser localizada de maneira a ser representativa da área na qual está situada. Sua localização deve obedecer a uma disposição que atenda a uma operação contínua, durante pelo menos 10 anos, e não modifique a exposição por longo período, a menos que sirva a um objetivo especial que justifique o seu funcionamento por um período mais curto.

Para o estudo de evaporação em reservatório o ideal é a realização das medidas sobre o manancial uma vez que a área inundada cria um ambiente próprio, diferente do terrestre e, conseqüentemente, há diferenças entre as medidas desses dois ambientes. Entretanto uma bacia experimental é um laboratório em campo destinado a diversos tipos de pesquisa, o que indica a instalação da estação meteorológica em ambiente terrestre para a realização de outras pesquisas, uma vez que o custo de implantação de equipamentos é significativo e o uso desses equipamentos deve ocorrer em várias linhas de pesquisa. No caso de ter recurso disponível recomenda-se a instalação também de medições climatológicas no ambiente do lago.

A escolha do local para instalação dos equipamentos na área da bacia experimental tem como critério principal a segurança desses equipamentos devido a ocorrência constante de vandalismo.

A manutenção dos equipamentos é realizada periodicamente para garantir a qualidade dos dados obtidos.

## 3.2 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

### 3.2.1 Aquisição e tratamento dos dados

A aquisição dos dados necessários consiste na coleta dos dados, a partir de campanhas periódicas para acompanhamento do funcionamento dos equipamentos, e realização do tratamento dos dados coletados, observando a existência de falhas, valores duvidosos e definindo a distribuição temporal da precipitação e variáveis climatológicas na bacia experimental.

O tratamento dos dados coletados refere-se ao cálculo das médias diárias e mensais das variáveis climatológicas e vazões afluentes e efluentes e dos totais diários e mensais de chuva.

### 3.2.2 Cálculo da evaporação

A determinação da taxa de evaporação consta primeiro da seleção dos métodos de estimativa da evaporação a serem utilizados, que consiste em avaliar os cenários para o qual eles foram elaborados e calibrados, quais as variáveis de influência no fenômeno que são consideradas, dados necessários para aplicação e determinação de qual o método mais indicado para a presente pesquisa. Os critérios de seleção abrangem a avaliação da representação física do fenômeno para o caso de estudo e os dados necessários disponíveis.

Para os métodos baseados nos princípios do balanço de energia, a radiação líquida é a variável chave e comum aos diversos métodos.

Para o cálculo da radiação líquida, necessário na aplicação dos métodos do Balanço de Energia simplificado, de Priestley e Taylor e de Penman são utilizadas as formulações descritas em Tucci e Beltrame (2000) e Dias (1986). Já para a aplicação do método de Morton são utilizadas as fórmulas propostas pelo próprio autor em Morton (1983a).

***Estimativa da Radiação líquida para os métodos do Balanço de Energia simplificado, de Priestley e Taylor e de Penman***

A partir da distribuição da energia que ocorre na atmosfera, a radiação líquida ( $R_l$ ) é expressa genericamente pela seguinte relação (DIAS, 1986):

$$R_l = (1 - \alpha) R_{oc} - (R_{emit} - \varepsilon \cdot R_{abs}) \quad (2)$$

onde  $\alpha$  é o albedo (parte da radiação solar incidente na superfície que é refletida);  $R_{oc}$  é a radiação incidente com comprimento de onda curto;  $R_{emit}$  é a radiação emitida pela superfície com comprimento de onda longo;  $\varepsilon$  é coeficiente de emissibilidade, o qual estima a emissão de radiação de um corpo; e  $R_{abs}$  é a parcela da radiação térmica com comprimento de onda longo absorvida pela superfície.

A radiação incidente com comprimento de onda curto ( $R_{oc}$ ) é uma parcela da radiação no topo da atmosfera que depende da posição geográfica do local de interesse e das condições climáticas que atuam sobre os raios solares. TUCCI; BELTRAME (2000) cita que Angstrom propôs a seguinte equação para relacionar a radiação no topo da atmosfera ( $R_t$ ) com a radiação incidente de onda curta ( $R_{oc}$ ):

$$R_{oc} = R_t (a + b \cdot p) \quad (3)$$

onde  $a$  e  $b$  são parâmetros que depende do local e  $p$  é a proporção entre o efetivo número de horas de brilho solar e o máximo possível.

A radiação emitida pela superfície com comprimento de onda longo ( $R_{emit}$ ) é retratada de acordo com a lei de Stefan-Boltzman para um corpo cinzento, uma vez que os corpos naturais não são corpos negros perfeitos, sendo a radiação emitida reduzida de um fator que depende da superfície, o coeficiente de emissividade. O fator de redução para a superfície de água é da ordem de 0,97 (Anderson apud TUCCI; BELTRAME, 2000).

A radiação emitida é expressa por:

$$R_{emit} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

onde  $\varepsilon$  é coeficiente de emissibilidade;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman igual a  $5,67 \cdot 10^{-8}$   $w/m^2/K^4$  e  $T$  é a temperatura absoluta da superfície de radiação (Kelvin).

A parcela da radiação térmica com comprimento de onda longo absorvida pela superfície ( $R_{abs}$ ) é expressa por:

$$R_{abs} = \varepsilon_{ac} \sigma T^4 \quad (5)$$

O coeficiente de emissibilidade da atmosfera para céu claro ( $\varepsilon_{ac}$ ) foi expresso por Brunt segundo a seguinte equação (DIAS, 1986):

$$\varepsilon_{ac} = A + B \sqrt{e_a} \quad (6)$$

onde  $e_a$  é a pressão de vapor d'água numa altura acima da superfície; e  $A$  e  $B$  são coeficientes calibrados para cada localidade.

A pressão parcial do vapor d'água é obtida por:

$$e_a = \frac{U e_s}{100} \quad (7)$$

onde  $U$  é a umidade relativa do ar em % e  $e_s$  é obtido pela seguinte expressão:

$$e_s = 4,58 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (8)$$

onde  $T$  é a temperatura em °C e  $e_s$  em mm de Hg.

Substituindo os termos da **equação 3** pelas **equações 4, 5, 6 e 7**, a radiação líquida então pode ser expressa da seguinte maneira:

$$R_l = (1 - \alpha) R_t (a + bp) - 0,97 \sigma T^4 + 0,97 \sigma T^4 (A + B \sqrt{e_a}) \quad (9)$$



Essa equação considera o céu claro, sem presença de nuvens. Tucci e Beltrame (2000) cita que Penman introduziu o coeficiente “ $c + d.p$ ” para esta correção, onde  $c$  e  $d$  são parâmetros locais.

A **Equação 9** pode ser então expressa como:

$$R_l = (1 - \alpha) R_i (a + bp) - 0,97 \sigma T^4 (1 - (A + B \sqrt{e_a})(c + dp)) \quad (10)$$

### *Lei de Dalton*

Tal fórmula expressa a evaporação a partir da seguinte equação:

$$E = k (e_s - e_a) \quad (11)$$

onde  $E$  é a evaporação,  $k$  é um coeficiente empírico,  $e_s$  é a pressão parcial de saturação do vapor d’água na temperatura da superfície,  $e_a$  é a pressão parcial do vapor d’água numa altura acima da superfície.

### *Razão de Bowen*

A Razão de Bowen é também muito utilizada pelos métodos de balanço de energia e é expressa por:

$$B = \frac{H}{LE} \quad (12)$$

onde  $H$  é o calor sensível,  $LE$  é fluxo de calor latente de evaporação. Essa relação é conhecida como razão de Bowen.

Os fluxos de calor sensível e calor latente em escala de tempo horária são derivados da teoria da similaridade de Monin-Obukhov (apud REIS; DIAS, 1998):

$$H = \rho \cdot c_p \cdot f_H \cdot w(T_s - T_a) \quad (13)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar;  $c_P$  é o calor específico do ar a pressão atmosférica;  $w$  é a velocidade do vento;  $f_H$  é um coeficiente de transferência de calor;  $T_s$  é a temperatura da superfície e  $T_a$  é a temperatura do ar.

$$LE = \frac{0,622L}{P} \rho \cdot f_E \cdot w(e_s - e_a) \quad (14)$$

onde  $f_E$  é um coeficiente de transferência de vapor d'água;  $e_s$  é a pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície,  $e_a$  é a pressão de vapor numa altura acima da superfície e  $P$  é a pressão atmosférica..

Bowen admitiu que existe similaridade nos transportes de calor e vapor, logo considerou os coeficientes de transporte iguais (VILLELA; MATTOS, 1975)

A razão de Bowen fica então em função do gradiente de tensão de vapor e de temperatura observados acima da superfície (BRUTSAERT, 1982), conforme expressão abaixo:

$$B = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \quad (15)$$

onde  $\gamma$  é a constante psicrométrica dada por :

$$\gamma = \frac{c_P \cdot P}{0,622L} \quad (16)$$

O valor de  $\gamma$  oscila em torno de 0,5 mmHg/°C ou 0,67 mb/°C (TUCCI; BELTRAME, 2000; VILLELA; MATTOS, 1975).

A seguir está apresentada a formulação dos diversos métodos de estimativa da evaporação.

### ***Método do Balanço de Energia***

O balanço de energia para um reservatório ao longo de um período determinado de tempo é obtido pela **Equação 1** apresentada no **capítulo 2**:

$$W_F = W_I + Fa \cdot \Delta t - Fe \cdot \Delta t - (LE + H) \cdot \Delta t + R_l \cdot \Delta t + G \cdot \Delta t$$

A diferença de energia armazenada nas águas de um lago num dado período de tempo corresponde a um fluxo médio de calor ( $D$ ) entre a superfície do lago e o seu volume, que é representado pela seguinte expressão:

$$D = (W_F - W_I) \quad (17)$$

Dessa forma a **Equação 1** pode ser escrita como:

$$R_l + Fa - Fe = LE + H + G + D \quad (18)$$

sendo o lado direito da equação a energia total afluyente ao reservatório, que será usada para evaporar a água ( $LE$ ), aquecer o ar ( $H$ ) e aquecer o lago ( $D$ ). As energias  $LE$  e  $H$  são consideradas positivas quando vão da superfície do lago para a atmosfera, já a energia  $D$  é considerada positiva quando dirigida da superfície para o corpo do lago e  $G$  quando dirigida do fundo para o corpo do lago.

Quando a temperatura de entrada e de saída da água não são tão diferentes e o volume de entrada não é grande comparado à capacidade de armazenamento do reservatório, o calor advectado pode ser desprezado; o fluxo de calor através do fundo do lago,  $G$ , é usualmente desprezado (ASSOULINE; MAHER, 1993; REIS; DIAS, 1998; SIMON; MERO, 1985). Essa simplificação resulta na equação simplificada do Balanço de Energia.

$$LE = \frac{1}{1+B} (R_l - D) \quad (19)$$

### ***Método de Penman***

A expressão de Penman para cálculo da evaporação, em mm, é a seguinte:

$$E_p = \frac{\frac{\Delta}{\gamma L} \cdot R_l + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (20)$$

onde  $R_l$  é a radiação líquida disponível calculada pela **Equação 10**;  $E_a$  é o poder evaporante do ar à sombra;  $\Delta$  é a tangente à curva de saturação do vapor e  $\gamma$  é a constante psicrométrica de Bowen.

Dessa forma,  $\Delta$  é definida pela seguinte expressão:

$$\Delta = \frac{e_s(T_s) - e_s(T_a)}{T_s - T_a} = \frac{\partial e_s(T)}{\partial T} \quad (21)$$

onde o índice  $T_a$  representa a temperatura do ar e  $T_s$  a temperatura da superfície.

O termo  $\frac{\Delta}{\gamma}$  é obtido pela derivada **Equação 8**, resultando, para condições isotérmicas

( $T_a=T_s$ ), em:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640.10^{\frac{7.5T}{237.3+T}}}{(237,3 + T)^2} \quad (22)$$

O poder evaporante do ar à sombra ( $E_a$ ), ou seja, o termo aerodinâmico que representa a energia advectiva, é expressa em função da velocidade do vento a 2 m de altura da superfície da água e do déficit de pressão de vapor, conforme a seguir:

$$E_a = 0,35 \cdot \left(0,5 + \frac{w_2}{160}\right) \cdot (e_s - e_a) \quad (23)$$

onde  $w_2$  é a velocidade média do vento em km/dia, medida a 2 metros acima da superfície evaporante.

### ***Método de Priestley e Taylor***

Priestley e Taylor propuseram a seguinte equação:

$$E_{PT} = \alpha_e \frac{\Delta_0}{\Delta_0 + \gamma} \cdot \frac{R_l - D}{L} \quad (24)$$

onde a temperatura da superfície da água  $T_0$  pode ser usada para calcular a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água,  $\Delta$ . Para a média de um grande número de situações  $\alpha_e = 1,26$  (REIS; DIAS, 1998).

### ***Método de Morton***

A estimativa de evaporação em reservatórios é obtida com base no conceito de relação complementar e para a sua aplicação é necessário seguir os seguintes procedimentos, conforme Morton (1983a):

1) Cálculo da relação entre a pressão atmosférica na estação climatológica de medição e a pressão ao nível do mar ( $p/p_s$ ) dada por:

$$p/p_s = \left[ \frac{(288 - 0,0065H)}{288} \right]^{5,256} \quad (25)$$

onde H é a altitude em metros no local da estação.

2) Cálculo de  $e_D$ , a pressão de saturação do vapor na temperatura média do ponto de orvalho  $T_D$  em mbar, de  $e_s$ , pressão de saturação do vapor na temperatura do ar T em mbar e  $\Delta$ , a tangente da curva de pressão de saturação do vapor em função de T, expressa em mbar/°C, com base nas seguintes relações:

$$e_D = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_D}{T_D + 237,3}\right) \quad (26)$$

$$e_s = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (27)$$

$$\Delta = \frac{17,27 \cdot 237,3 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (28)$$

para as temperaturas expressas em °C.

3) Cálculo dos ângulos e funções relacionadas à estimativa da radiação global no topo da atmosfera (GE) em W/m<sup>2</sup>:

$$\theta = 23,2 \cdot \text{sen}(29,5i - 94) \quad (29)$$

$$\cos Z = \cos(\phi - \theta) \quad (30)$$

$$\cos \varpi = 1 - \frac{\cos Z}{\cos \phi \cdot \cos \theta} \quad (31)$$

$$\cos \varpi \geq -1 \quad (32)$$

$$\cos z = \cos Z + \left[ \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\text{sen } \varpi}{\varpi} - 1 \right] \cos \phi \cdot \cos \theta \quad (33)$$

$$\eta = 1 + \left( \frac{1}{60} \right) \cdot \text{sen}(29,5i - 160) \quad (34)$$

$$G_E = \left( \frac{1354}{\eta^2} \right) \cdot \left( \frac{\varpi}{180} \right) \cdot \cos z \quad (35)$$

onde  $\theta$  é a declinação do sol em graus;  $i$  número do mês começando com 1 para janeiro e terminando em 12 para dezembro;  $\phi$  latitude em graus (negativa para o hemisfério sul);  $Z$  é o ângulo zenital ao meio dia;  $z$  é ângulo zenital médio diário;  $\varpi$  os graus de rotação da Terra entre o nascer do sol e o meio dia; e  $\eta$  a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol.

Para a opção de cálculo da evaporação de períodos menores que mensal, é necessário fazer a correção de  $i$  com a expressão a seguir:

$$i = \frac{[I + 0,5 \cdot (m - 1)]}{m} \quad (36)$$

onde  $m$  é igual ao número de períodos em cada mês de tal forma que os primeiros períodos tem o mesmo número de dias e o último tem o número de dias requerido para completar o mês. A variável  $m$  deve estar restrita aos valores de 2, 3, 5 e 6.  $I$  é o número do período, com  $I = 1$  para o primeiro período de janeiro e  $I = 12m$  para o último período em dezembro. A constante da **Equação 29** passa a ser igual a 23,4.

4) Cálculo do vapor d'água precipitável ( $W$ ) em milímetros e do coeficiente de turbidez ( $j$ ) obtidos por:

$$W = \frac{e_a}{\left(0,49 + \frac{T}{129}\right)} \quad (37)$$

$$c_1 = 21 - T \quad (38)$$

$$0 \leq c_1 \leq 5 \quad (39)$$

$$j = (0,5 + 2,5 \cos^2 z) \cdot \exp[c_1 (p / p_s - 1)] \quad (40)$$

O ângulo zenital médio diário  $z$  é incluído para adicionar algum tipo de variação sazonal e o fator  $c_1$  para diminuir os efeitos da altitude quando a temperatura média excede 16°C, e eliminar estes, quando a média da temperatura excede 21°C.

5) Cálculo da transmitância de céu claro  $\tau$  e suas frações absorvidas  $\tau_a$  dadas por:

$$\tau = \exp \left[ -0,089 \cdot \left( \frac{p}{p_s} \right)^{0,75} - 0,083 \cdot \left( \frac{j}{\cos z} \right)^{0,9} - 0,029 \cdot \left( \frac{W}{\cos z} \right)^{0,6} \right] \quad (41)$$

$$\tau_a = \exp \left[ -0,0415 \cdot \left( \frac{j}{\cos z} \right)^{0,9} - 0,0029^{0,5} \cdot \left( \frac{W}{\cos z} \right)^{0,3} \right] \quad (42)$$

$$\tau_a \geq \exp \left[ -0,0415 \cdot \left( \frac{j}{\cos z} \right)^{0,9} - 0,029 \cdot \left( \frac{W}{\cos z} \right)^{0,6} \right] \quad (43)$$

6) Cálculo da radiação global para céu claro ( $G_o$ ) e estimativa da radiação global incidente

( $G$ ):

$$G_o = G_E \tau \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\tau}{\tau_a} \right) \cdot (1 + \alpha \tau) \right] \quad (44)$$

$$G = S G_o + (0,08 + 0,30S)(1 - S) G_E \quad (45)$$

onde  $\alpha$  é o albedo da água com valor constante igual a 0,05; e  $S$  é a razão de insolação. Para o caso de existir medidas de radiação global incidente ( $G$ ) a insolação  $S$  pode ser estimada por:

$$S = \frac{0,53G}{G_o - 0,47G} \quad (46)$$

com  $S$  variando de 0 a 1.

7) Estimativa do incremento proporcional da radiação atmosférica devido a presença de nuvens ( $\rho$ ):

$$c_2 = 10 \left( \frac{e_a}{e_s} - S - 0,42 \right) \quad (47)$$

$$0 \leq c_2 \leq 1 \quad (48)$$

$$\rho = 0,18 \left[ (1 - c_2) \cdot (1 - S)^2 + c_2 (1 - S)^{0,5} \right] \cdot \frac{P}{P_s} \quad (49)$$



A razão da equação  $p/p_s$  na equação 50 reflete a tendência das nuvens estarem perto do solo em altas altitudes.

8) Cálculo da radiação líquida de ondas longas perdida para a superfície ( $B$ ) obtida pela seguinte equação:

$$B = \varepsilon\sigma(T + 273)^4 \left[ 1 - (0,71 + 0,007e_a \cdot \left(\frac{p}{p_s}\right))(1 + \rho) \right] \quad (50)$$

$$B \geq 0,05\varepsilon\sigma(T + 273)^4 \quad (51)$$

A **Equação 51** tem efeito somente para condições de muito calor, umidade e nebulosidade tal como acontece em baixas altitudes de regiões equatoriais durante certos períodos do ano.

9) Estimativa da radiação líquida ( $R_w$ ), do fator de estabilidade ( $\xi$ ), do coeficiente de transferência de vapor ( $ft$ ) e do coeficiente de transferência de calor sensível ( $\lambda$ ).

$$R_w = (1 - \alpha)G - B\varepsilon \quad (52)$$

$$\lambda = \gamma p + \frac{4\varepsilon\sigma(T + 237)^3}{ft} \quad (53)$$

$$ft = \frac{1}{\xi} \cdot \left[ \frac{s}{P} \right]^{0,5} fz \quad (54)$$

$$\frac{1}{\xi} = 0,28 \left( 1 + \frac{e_a}{e_s} \right) + \frac{\Delta R_w}{\gamma p \left[ \frac{p_s}{p} \right]^{0,5} b_o fz (e_s - e_a)} \quad (55)$$

$$\frac{1}{\xi} \leq 1 \quad (56)$$

onde  $b_o$  é igual 1,12,  $\gamma p = (\gamma p_s)(p/p_s)$  e  $fz$  e  $\gamma p_s$  são 25 W/m<sup>2</sup>mbar e 0,66 mbar/°C.

10) Estimativa da temperatura de equilíbrio  $T_p$  obtida convergindo iterativamente as equações:

$$[\delta T_p] = \frac{\left[ \frac{R_w}{ft} + e_a - e'_p + \lambda(T - T'_p) \right]}{\Delta'_p + \lambda} \quad (57)$$

$$T_p = T'_p + \delta T \quad (58)$$

$$e_p = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_p}{T_p + 237,3}\right) \quad (59)$$

$$\Delta'_p = \frac{17,27 \cdot 237,3 \cdot e_p}{(T_p + 237,3)^2} \quad (60)$$

A **Equações 57-60** são repetidas iniciando com  $T'_p$  igual a  $T$  até que  $[\delta T_p]$  seja menor ou igual a  $0,01^\circ\text{C}$ .

11) Estimativa da evaporação potencial ( $E_p$ ) da radiação líquida para a temperatura de equilíbrio ( $R_{wp}$ ) e a evaporação do lago ( $E_w$ ):

$$E_p = R_w - \lambda ft(T_p - T) \quad (61)$$

$$R_{wp} = E_p + \gamma p \cdot ft(T_p - T) \quad (62)$$

$$E_w = b_1 + b_2 \left(1 + \frac{\gamma p}{\Delta p}\right)^{-1} \cdot R_{wp} \quad (63)$$

onde as constantes  $b_1$  e  $b_2$  são  $13 \text{ W/m}^2$  e  $1,20$  respectivamente.

Para converter a evaporação potencial e a evaporação do lago de unidade de energia  $\text{W/m}^2$  em evaporação em milímetros é necessário dividir pelo calor latente de vaporização ( $L$ ).

### ***Balanco Hídrico do reservatório***

O balanço hídrico de um reservatório pode ser expresso por:

$$V_F = V_I + Q_a \cdot \Delta t - Q_e \cdot \Delta t + S_a \cdot \Delta t - S_e \cdot \Delta t + P \cdot A - E \cdot A \quad (64)$$

onde  $V_F$  e  $V_I$  são os volumes armazenados no início e final do intervalo do tempo estudado;  $Q_a$  é a vazão superficial afluyente ao reservatório;  $Q_e$  é a vazão efluente;  $S_a$  é a vazão subterrânea afluyente e  $S_e$  a efluente;  $P$  é a precipitação ocorrida no intervalo de tempo estudado;  $A$  é a área alagada e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo estudado.

A formulação para cálculo da evaporação a partir da **Equação 64** em termos de volume, fica, então, para um determinado intervalo de tempo, expressa por:

$$V_{evap} = \Delta V - V_p + V_{escoa} - V_{inf} - V_{uso} - V_{extrav} \quad (65)$$

onde  $V_{evap}$  é o volume evaporado,  $\Delta V$  é a variação do volume,  $V_p$  é o volume precipitado,  $V_{escoa}$  é o volume escoado afluyente ao reservatório,  $V_{inf}$  é o infiltrado,  $V_{uso}$  é o volume utilizado no atendimento a demanda e  $V_{extrav}$  é o volume extravasado no intervalo de tempo determinado. Para a obtenção da taxa de evaporação no reservatório divide-se o volume evaporado pela superfície alagada.

### ***Tanque Classe A***

Como os dados Tanque Classe A é usualmente utilizado em estudos e projetos para dimensionamento de reservatórios na região semi-árida, é realizada a avaliação dos dados observados na bacia experimental, quanto à confiabilidade e consistência, e comparação com os valores calculados com base nos dados climatológicos para estimativa do coeficiente que relaciona dados de tanque com dados de evaporação do lago. Essa estimativa é realizada a partir dos dados obtidos pela aplicação do método de Morton, por ser o único a fornecer evaporação no lago e não apenas evaporação potencial.

### 3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

A discussão dos resultados engloba três linhas de análise. A primeira é referente a qualidade da estimativa da evaporação com a aplicação dos métodos de cálculo desse fenômeno, a segunda trata da elaboração da caracterização da evaporação nos açudes da bacia experimental utilizando os dados do método que melhor representou o comportamento da evaporação para a bacia experimental e a terceira análise refere-se à avaliação da utilização da bacia experimental na avaliação da evaporação em açudes do semi-árido.

#### 3.3.1 Comparação dos valores estimados da evaporação

Para a avaliação dos resultados obtidos pela aplicação dos métodos de estimativa de evaporação são feitas a duas comparações: uma referente à evaporação potencial calculada através das formulações do Balanço de Energia, de Penman, de Priestley e Taylor e Morton e outra utilizando os valores de evaporação definidos pelo balanço hídrico do reservatório, método de Morton para evaporação do lago e pela medição desse fenômeno no evaporímetro tipo Tanque Classe A.

Esses valores são comparados com dados de série histórica consistida da localidade mais próxima com dados disponíveis para verificação da coerência dos resultados com a região.

O objetivo dessa análise é a definição do método de cálculo que melhor representou o fenômeno da evaporação no cenário estudado. Os critérios para essa seleção envolve a observação das simplificações feitas para adequação aos dados disponíveis, do resultado da comparação com valores consistidos da região e comparação com os resultados obtidos pela medição no Tanque Classe A.

### **3.3.2 Análise do comportamento da evaporação na bacia hidrográfica experimental**

Definido o método de estimativa de evaporação em reservatórios que melhor representou o cenário de estudo é feita a caracterização desse fenômeno na bacia experimental, analisando seu comportamento para o período de dados utilizado.

A avaliação dos impactos da evaporação é feita com base na representatividade desse fenômeno dentro do balanço hídrico do reservatório, verificando a sua influência na performance desse sistema de armazenamento de água.

### **3.3.3 Avaliação da bacia hidrográfica experimental para estudo da evaporação**

Diante dos resultados obtidos, aliado à observação e avaliação do comportamento hidroclimatológico da bacia experimental durante o período de estudo, são discutidas e avaliadas a qualidade dos dados coletados, as dificuldades encontradas, a qualidade das informações geradas para definição de ações de gerenciamento, a representatividade da área escolhida e a adequação da metodologia utilizada para minorar os problemas gerados pela falta de informação na gestão de recursos hídricos do semi-árido.

## 4 BACIA EXPERIMENTAL DO RIO DO CEDRO

Para verificação da metodologia, proposta no Capítulo 3, é apresentada a seguir sua aplicação para região semi-árida com a implantação de uma bacia hidrográfica experimental, visando o desenvolvimento de estudos relacionados à evaporação em reservatórios. Essa estratégia experimental foi realizada no âmbito do Projeto Integrado de Implantação de Bacia Experimental no Semi-árido (IBESA), referente à bacia experimental da Universidade Federal da Bahia - UFBA. Esta bacia foi instalada pelo Grupo de Recursos Hídricos da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, com o objetivo de gerar informações sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas localizadas na região semi-árida.

### 4.1 IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL

#### 4.1.1 Seleção do local de implantação

Os critérios de seleção da bacia experimental para a presente pesquisa foram: (i) estar totalmente inserida no clima semi-árido, (ii) apresentar embasamento cristalino, caracterizado por solos rasos, aonde a rocha mãe chega a aflorar, determinando maiores escoamentos superficiais e baixa infiltração, já que o cristalino está presente em cerca de 70% do semi-árido; (iii) apresentar a caatinga como vegetação predominante e (iv) englobar a área de drenagem de açude com problemas de quantidade e qualidade da água, configurando a realidade da região em questão.

Foram identificados nos mapas planialtimétricos que apresentam a área da bacia do rio Jacuípe, subbacia do Rio Paraguaçu, possíveis áreas de implantação da bacia experimental, ou seja, pequenos reservatórios com área de drenagem inferior a 25 km<sup>2</sup>. Para a avaliação das áreas foram realizadas duas viagens; uma para a região do município de Piritiba, realizando

uma análise dos barramentos existentes no rio do Ouro afluente do rio Jacuípe, na qual não foi identificado um barramento que satisfizesse os critérios por causa da área de drenagem e apoio logístico para a implantação e manutenção da bacia, além da distância da região para a cidade de Salvador. A outra viagem foi para a região do município de Valente para avaliação do reservatório dessa cidade e do reservatório da cidade vizinha São Domingos. O reservatório de Valente tem área de drenagem na ordem de 50 Km<sup>2</sup> sendo descartada a sua utilização, já o reservatório de São Domingos apresenta área de drenagem de 20 km<sup>2</sup>, com a presença de dois reservatórios a montante, o que possibilitou a instalação da bacia experimental com área adequada, satisfazendo também os demais critérios estabelecidos para a seleção do local de implantação.

#### **4.1.2 Reconhecimento e caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica experimental do rio do Cedro (BHEC), com área de 20,53 km<sup>2</sup>, está localizada aproximadamente no centro do quadrilátero compreendido entre as coordenadas 11° e 12° (Latitude Sul) e 39° e 40° (Longitude Oeste). A área pertence ao município de São Domingos, a 250 km de Salvador, no Estado da Bahia (**Figuras 3 e 4**). Esta bacia coincide com a área de drenagem do barramento de terra no riacho do Cedro, conhecido como Açude São Domingos. Os cursos d'água estudados estão situados no trecho médio da bacia hidrográfica do Rio Jacuípe, afluente do rio Paraguaçu.

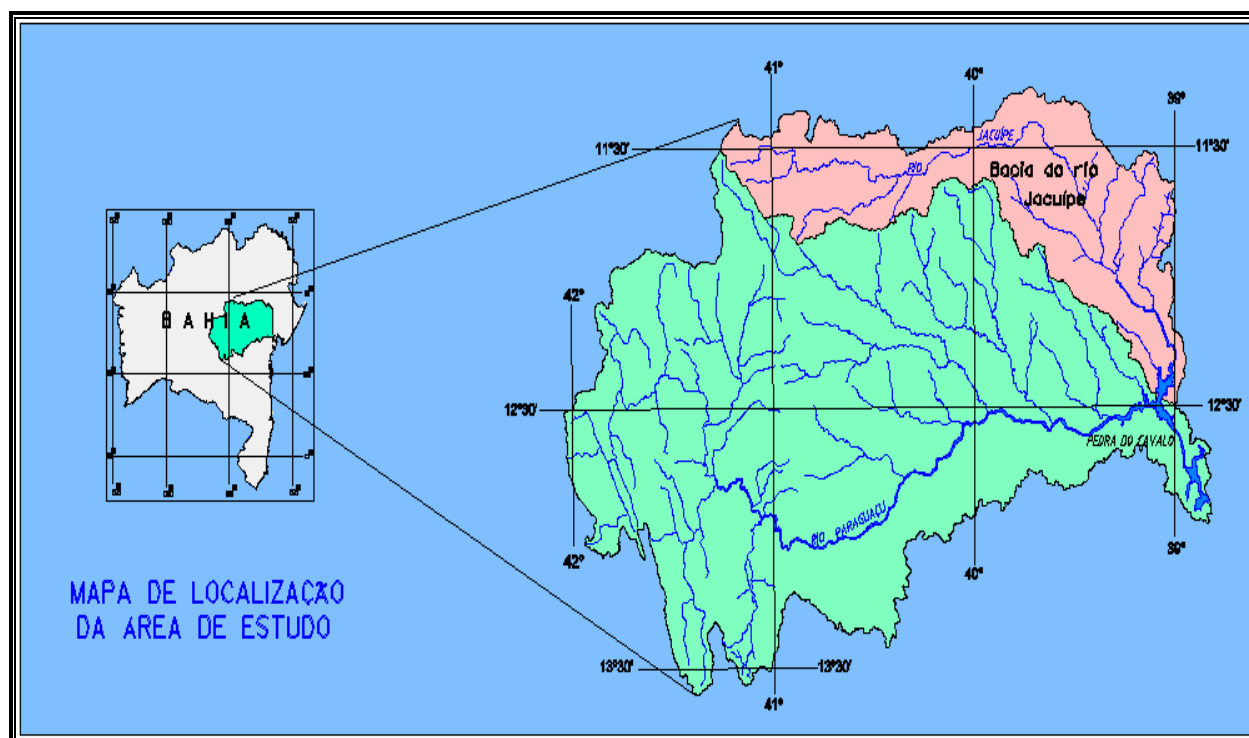
O rio Jacuípe é maior contribuinte do rio Paraguaçu, tem grande importância para o Estado da Bahia, apresentando uma complexidade elevada de gerenciamento e planejamento devido à intermitência do rio principal em quase todo seu curso, à existência de dois importantes reservatórios (França e São José do Jacuípe), à intensa atividade industrial no trecho baixo e ao alto grau de comprometimento das vazões regularizadas pelas barragens no atendimento às demandas. Esses fatos, aliado a sua localização em zona semi-árida e embasamento cristalino,

característico dessa região, motivou a escolha dessa região para a implantação da Bacia Experimental.

A bacia experimental do rio do Cedro (BHEC) possui características representativas da região semi-árida, podendo ser usada para extrapolação dos resultados na bacia do rio Jacuípe, em zonas com características hidroclimatológicas e fisiográficas similares.

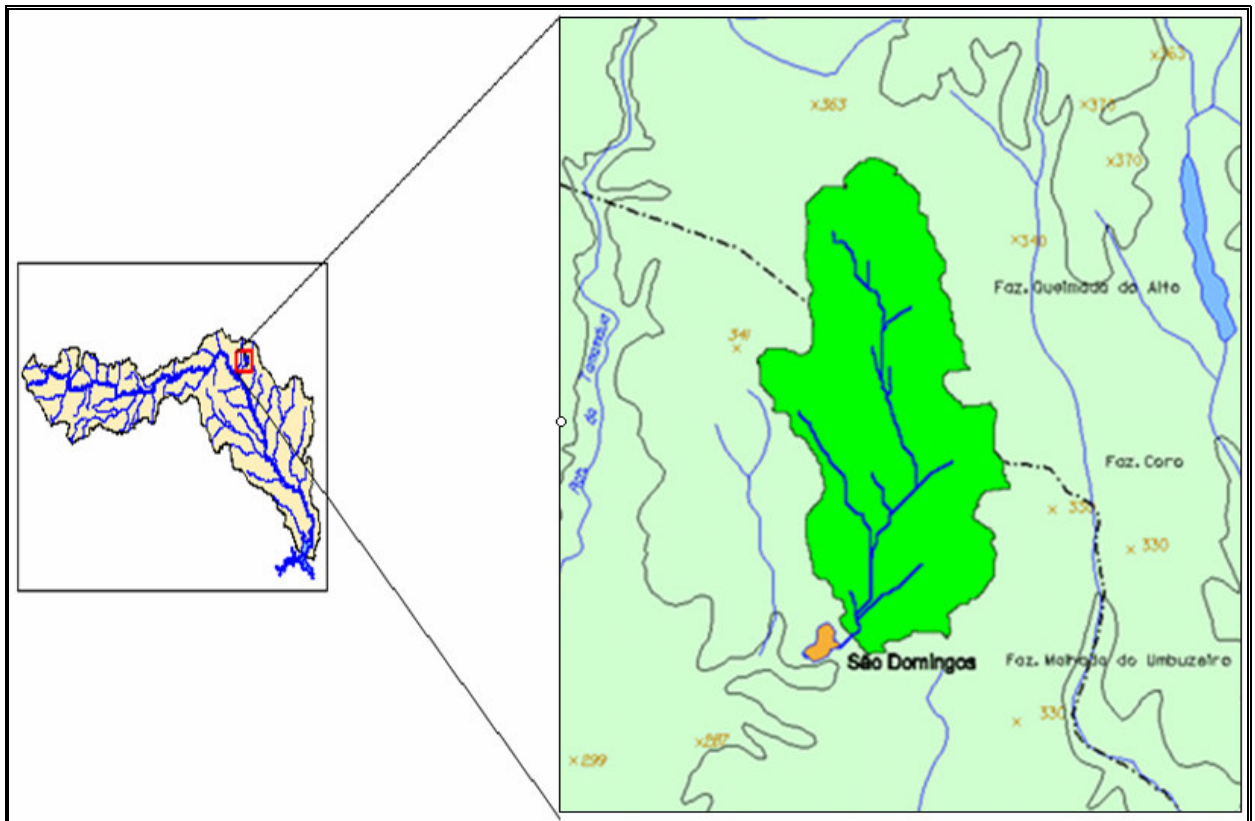
Esta região é conhecida como Zona do Sisal da Bahia, muito castigada pelas secas, devido a irregularidade da distribuição temporal e espacial da precipitação, sendo esta normalmente escassa, configurando o clima semi-árido.

A localização da BHEC em relação ao Estado da Bahia encontra-se apresentada nas **Figuras 3 e 4**.



**Figura 3: Localização da Bacia do Rio Paraguaçu – Bahia**





**Figura 4: Localização da bacia experimental do rio do Cedro na Bacia do Rio Paraguaçu – Bahia**

O clima presente nessa região segundo a classificação climática de Thornthwaite é semi-árido com índices de umidade entre -20 a -40, com 9 a 12 meses secos durante o ano (BAHIA, 1996).

Outra característica predominante do semi-árido Nordestino e que se apresenta de forma constante na bacia é o afloramento de rochas devido a estar inserida na parte cristalina do Sertão.

A BHEC apresenta um número relativamente elevado de açudes, além de duas depressões naturais no curso do rio principal e vários “tanques” particulares cavados no solo sem revestimento para captação da água da chuva, ainda não cadastrados, que ocasionam um acúmulo significativo da água escoada. A área de estudo engloba três reservatórios no curso principal, sendo um principal e dois de menor porte, equivalendo a uma densidade média de quase um açude para cada 7 km<sup>2</sup>.

O açude de São Domingos é formado por uma barragem de terra que possui um sangradouro no ombro esquerdo. A barragem está localizada nas coordenadas geográficas 11°28'02.2" latitude sul e 39°31'30" longitude oeste e é utilizada como estrada de acesso para outra margem. A **Figura 5** apresenta uma visão geral do açude de São Domingos, visto de cima da barragem.



**Figura 5: Açude de São Domingos – maio 2002**

O açude São Domingos encontra-se salinizado, portanto, com vários usos comprometidos, sobretudo os mais nobres. Hoje tem a sua água utilizada somente para a criação de animais e cultivo de alimentos no seu entorno. A utilização do açude se estende ainda à atividade pesqueira, balneário sem infra-estrutura e banho de animais. Sua capacidade máxima de armazenamento é de 1.966.000 m<sup>3</sup> com altura máxima de 14,5 metros (BAHIA, 1996) e área alagada de 1.041.500 m<sup>2</sup>, sendo que em maio de 2003 apresentava um espelho d'água com apenas 443.822,9 m<sup>2</sup>.

O segundo reservatório do rio do Cedro, denominado Nenenzinho (**Figura 6**), drena uma área de 11,14 km<sup>2</sup>, armazenando um volume máximo de 173.681,26 m<sup>3</sup>. A topografia da área inundada pelo reservatório está apresentada na **Tabela 1** por meio da relação cota-área-volume do reservatório. Esse reservatório armazena águas com alto teor de sal.

**Tabela 1: Relação cota X área X volume do açude de Nenezinho**

COTA (m)	ÁREA (M <sup>2</sup> )	VOLUME (M <sup>3</sup> )
299	1.631,59	543,86
300	24.515,49	13.617,40
301	66.824,04	59.287,17
302	161.964,14	173.681,26

**Figura 6: Açude de Nenezinho – maio 2002**

O terceiro reservatório do rio do Cedro, construído em propriedade particular, é conhecido como açude Flori, compondo o primeiro barramento desse riacho e localizando-se nas coordenadas 11° 25' 36.6" latitude sul e 39° 31' 06.7" longitude oeste. Esse açude apresenta barramento de terra, sem perdas aparentes a jusante, com único uso constatado referente à dessedentação animal. Essas características, aliadas à sua pequena área de drenagem, 6 km<sup>2</sup>, resultaram na definição desse reservatório como açude piloto do projeto, onde serão monitoradas as entradas e saídas de água, além do seu nível d'água (**Figura 7**).



Figura 7: Açude de Flori – setembro de 2002

Esse reservatório armazena um volume máximo de 73.992,60 m<sup>3</sup>, sendo que sua topografia está representada pela relação cota-área-volume constante da **Tabela 2**.

**Tabela 2: Relação cota x área x volume do açude de Flori**

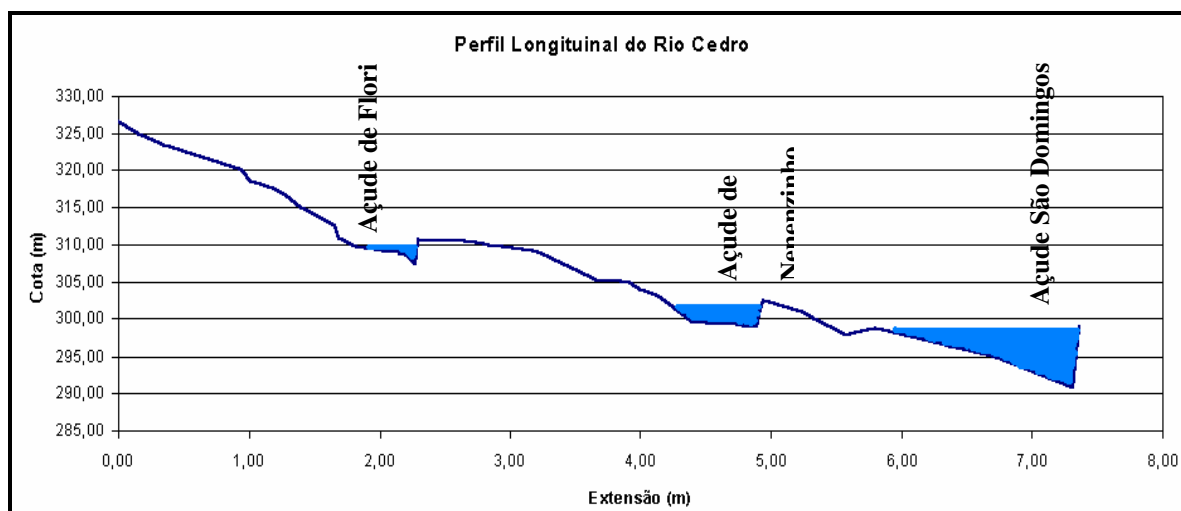
COTA (m)	ÁREA (M <sup>2</sup> )	VOLUME (M <sup>3</sup> )
307,38	0	0
308	1.147,15	355,62
309	5.140,64	3.677,32
310	39.258,15	25.876,71
310,5	56.973,63	73.992,60

Utilizando mapa topográfico na escala de 1:25.000 (ver anexo), elaborado especialmente para este estudo, foram estimados os parâmetros que definem as características físico-morfológicas da Bacia Experimental do Riacho do Cedro para cada área de drenagem dos açudes existentes ao longo do curso d'água principal da bacia, visando uma maior discretização da bacia (**Tabela 3**).

**Tabela 3: Parâmetros característicos da bacia experimental**

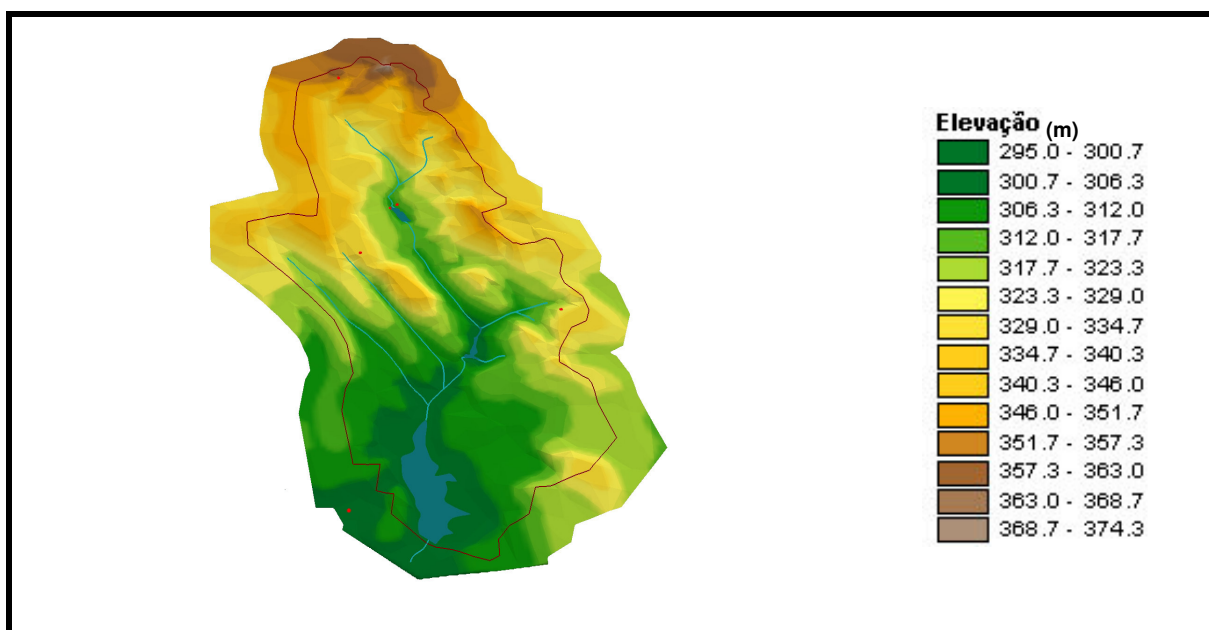
Parâmetros característicos	Reservatório São Domingos	Reservatório de Nenenzinho	Reservatório de Flori
Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	20,53	11,4	6,3
Índice de Compacidade	1,9	1,78	1,48
Índice de Declividade Global (m/km)	3,6	5,44	7,32
Desnível específico (m)	16,33	18,37	18,36
Diferença das cotas correspondentes a 5% e 95% da área (m)	50	52	40
Comprimento do rio mais longo (km)	7,31	4,79	2,28
Extensão da rede de drenagem (km)	16,33	8,04	3,64
Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> )	0,795	0,705	0,578

A **Figura 8** apresenta o perfil longitudinal do rio principal, identificando os três açúdes existentes ao longo do seu curso.



**Figura 8:** Perfil longitudinal do rio do Cedro

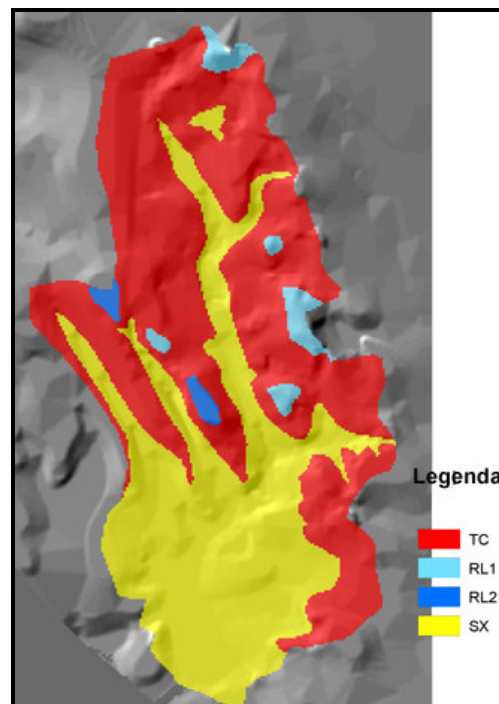
O relevo é predominantemente suave a plano. A região da bacia encontra-se totalmente embasada no cristalino, sem aquíferos explorados. A **Figura 9** apresenta a topografia em três dimensões representando o relevo da área de estudo, assim como a drenagem e açúdes existentes no rio principal.



**Figura 9:** Representação do relevo da BHEC

Devido à baixa pluviosidade as rochas são pouco intemperizadas, apresentando solos rasos ou mesmo afloramento de rochas em diversas áreas e, em outras, pequenos fragmentos rochosos sem a ocorrência de solo.

Os principais tipos de solo encontrados na área de estudo com as suas respectivas áreas de ocorrência estão apresentados na **Figura 10**.



**Figura 10:** Classificação pedológica da BHEC

A classificação TC é composta pela presença do solo LUVISSOLO CRÔMICO (antigo Bruno não-cálcico) e do NEOSSOLO LITÓLICO (antigo Regossolo), associados com o PLANOSSOLO HÁPLICO. O Luvissole crômico apresenta fase pedregosa e não pedregosa e relevo ondulado e suave ondulado, apresentando horizonte A moderado (profundidade acima de 10 cm) e textura média/argilosa na transição com o horizonte B, escurecido pela matéria orgânica. O Neossolo litólico configura um solo novo, pouco desenvolvido, com fase pedregosa e relevo ondulado e suave ondulado, apresentando horizonte A moderado e textura média. O Planossolo háptico apresenta acumulação de argila de atividade alta (Ta) e horizonte A fraco e moderado (profundidade alternando a cada ocorrência entre abaixo e acima de

10 cm) com textura média/argilosa e relevo plano. O Planossolo tem permeabilidade lenta por ser muito argiloso e adensado, retendo o lençol freático.

O solo tipo TC ocupa 11,62 km<sup>2</sup> da área de estudo, sendo muito raso com baixa capacidade de retenção de umidade e contribuindo para um escoamento superficial acentuado. Por ser eutrófico (quantidade de base maior que 50% do complexo de troca), com boa quantidade de nutrientes, pode ser considerado solo fértil.

A classificação tipo SX é composta pela presença do solo PLANOSSOLO HÁPLICO, do VERTISSOLO HIDROMÓRFICO e do NEOSSOLO LITÓLICO, associados com o LUVISSOLO CRÔMICO. O Planossolo háplico apresenta relevo plano e suave ondulado e acumulação de argila de atividade alta (Ta) e horizonte A fraco e moderado com textura arenosa/argilosa para a interface com o horizonte B, aparecendo também textura apenas argilosa. O Vertissolo hidromórfico apresenta textura argilosa e relevo plano e suave ondulado, já o Neossolo litólico apresenta fase pedregosa e relevo plano e suave ondulado, apresentando horizonte A moderado textura média e argilosa. O Luvissole crômico apresenta fase pedregosa e não pedregosa e relevo plano e suave ondulado, com horizonte A moderado, apresentando textura média/argilosa na interface com o horizonte B, mais afloramento de rochas.

O solo tipo SX está presente em 8,13 km<sup>2</sup> principalmente nas baixadas (fundo de vertente, com profundidade variando de pouca a mediana, apresentando de boa a excelente capacidade de retenção de umidade e tendência de escoamento superficial de nulo a fraco. Apresenta também a propriedade de ser eutrófico o que lhe confere boa fertilidade.

A classificação tipo RL1 é composta pela presença do solo NEOSSOLO LITÓLICO eutrófico com horizonte A moderado e fraco, apresentando textura média e argilosa, relevo suave ondulado e ondulado, mais afloramento de rochas. Esse solo ocupa as áreas mais elevadas,



englobando uma área de 0,58 km<sup>2</sup>. Apresenta também a propriedade de ser eutrófico o que lhe confere boa fertilidade.

A classificação tipo RL2 é composta também pela presença do solo NEOSSOLO LITÓLICO eutrófico, entretanto apresenta horizonte A fraco e textura média, relevo ondulado, mais afloramento de rochas. Esse solo ocupa também as áreas mais elevadas, englobando uma área de 0,2 km<sup>2</sup>. Apresenta boa fertilidade.

A vegetação natural predominante na área do município de São Domingos é a caatinga, composta por espécies xerófilas, algumas das quais são cactáceas. Dessa forma na composição vegetal predominante ocorrem: juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Mart.), umburana, mandacaru (*Cereus jamacuru* – cactácea) e umbuzeiro (**Figura 11**).



**Figura 11: Vegetação predominante na BHEC**

O solo apresenta alto grau de degradação, devido ao desmatamento para utilização da vegetação como alimento dos animais e para plantação de palma e sisal. Entretanto, normalmente em curtos períodos chuvosos, já apresenta revestimento com vegetação rasteira, predominantemente constituída por gramíneas.



### 4.1.3 Instrumentação da bacia experimental

A bacia foi instrumentada de modo a permitir o levantamento de informações hidrológicas relativas a dados climatológicos e informações geomorfológicas, distribuição de precipitação espacial e temporal, hidrogramas, níveis d'água de açude e corpos d'água, assim como parâmetros de infiltração, de evaporação e de evapotranspiração.

Para o estudo do comportamento do ciclo hidrológico na área de estudo foram instalados:

(i) uma **Estação Meteorológica Automática**, também chamada de Plataforma de Coleta de Dados - PCD, que consiste em um aparelho eletrônico de alto nível de automação que transmite dados de pressão atmosférica, temperatura, umidade do ar e do solo, velocidade e direção do vento, chuva e radiação, captados por sensores específicos conectados à plataforma. Os dados são armazenados em “data logger” para serem coletados com um computador portátil (**Figura 12**). Os dados coletados por esta estação são:

- ✓ chuva acumulada (mm) a cada 6 horas sem interrupção, passando a registrar também a cada 5 minutos durante a ocorrência da chuva;
- ✓ temperatura do ar (°C), umidade do ar (%), radiação global ( $W/m^2$ ), velocidade (m/s) e direção (graus) do vento e pressão atmosférica (mb) a cada 15 minutos.



Figura 12: Estação climatológica automática

(ii) um **conjunto evaporimétrico tipo Tanque Classe A**, formado por um tanque com forma circular com 1,20m de diâmetro e 0,25m de profundidade, confeccionado com chapa galvanizada (Tanque Classe A padrão), montado sobre um estrado especial de madeira a 15 cm da superfície do solo; um tanque intermediário cilíndrico de chapa galvanizada, diâmetro 30 cm, altura 20 cm, com tampa e suportes de ferro, tripé com altura de 30 cm; e um tanque medidor cilíndrico com diâmetro de 27 cm e 70 cm de altura, em chapa galvanizada e tampa removível, apresentando escala graduada em milímetros de evaporação ao longo do tubo de nível. A escolha desse conjunto foi definida pela simplificação apresentada na medição minimizando os erros de leitura comuns em micrômetros (acessório de leitura do Tanque Classe A convencional) e em dias de chuva, assim como na dificuldade de reabastecimento contínuo de água no Tanque Classe A para manutenção do nível adequado para realização da coleta de dados de evaporação (Figura 13).



**Figura 13: Conjunto evaporimétrico tipo Tanque Classe A**

(iii) três **pluviógrafos**, instrumento destinado a medir a precipitação (chuva) acumulada num intervalo de tempo. Consiste de um funil com 200 mm de diâmetro de abertura o qual recolhe a chuva e encaminha para um sistema de básculas alternadas que é constituído de uma haste

apoiada em seu centro com conchas nas extremidades formando um conjunto semelhante a uma gangorra. Quando a quantidade de chuva acumulada em uma báscula ou concha, atinge 0,25mm, o peso desta quantidade de líquido aciona o mecanismo, fechando um rel magnético, descartando o líquido e preparando a outra báscula ou concha para receber nova quantidade de líquido. O fechamento do relé magnético produz um pulso que  encaminhado a uma entrada contadora de pulsos da estao que  programada para reportar a precipitao (**Figura 14**). Os dados coletados nessas estaes referem-se a:

- ✓ chuva acumulada (mm) a cada 6 horas sem interrupo, passando a registrar também a cada 5 minutos durante a ocorrência da chuva;



**Figura 14:** Estaao pluviográfica

(iv) dois **lingrafos**, aparelhos registradores contínuos do nível de água, que permitem registrar os eventos significativos de curta durao ocorrendo especialmente em bacias de pequenas áreas. Cabe observar que o linígrafo no dispensa a instalao da régua, que deve, sempre que possível, ser lida normalmente às 7:00 e 17:00 h ou, pelo menos, uma vez por dia, permitindo os seus registros detectar prontamente um defeito mecânico do linígrafo.



Estão instalados para controle da vazão afluyente ao açude de Flori em dois medidores tipo Parshall, dispositivo de medição de vazão na forma de um canal aberto com dimensões padronizados. A água é forçada por uma garganta relativamente estreita, sendo que o nível da água à montante da garganta é o indicativo da vazão a ser medida, independentemente do nível da água à jusante de tal garganta. Os valores padronizados da largura da garganta da calha Parshall instaladas foram 91,5 cm e 152,5 cm (**Figura 15**). Foram instaladas duas calhas Parshall a montante do reservatório de Flori devido a identificação de duas entradas de água que deviam ser monitorada para definição da vazão afluyente a esse reservatório.



**Figura 15: Calha Parshall 5' e linígrafo de ultrassom**

As seções de réguas linimétricas foram instaladas nos três açudes (**Figuras 16 e 17**), para controle da variação do nível desses reservatórios; e nas seções do rio principal a montante da entrada do açude São Domingos e Nenenzinho para controle da vazão afluyente (**Figura 18**). Devido ao período de seca na região, essas seções a montante não foram calibradas para confecção da curva chave. No período de chuva as tentativas de medição de vazão não foram bem sucedidas não tendo dados suficientes para definição dessa calibração.



**Figura 16: Régua linimétrica – açude de Nenenzinho – novembro 2003**



**Figura 17: Posição das régua linimétrica – açude de Flori – novembro 2003**



**Figura 18:** Posição das réguas linimétricas – calha do rio a montante do açude São Domingos

Essa rede de instrumentos objetivou a geração da informação necessária para caracterizar e quantificar o comportamento hidrológico da bacia. Para o estudo da evaporação mais aprimorado seriam necessários equipamentos complementares que ao longo da pesquisa foram identificados, equipamentos para monitorar o ambiente do lago e as temperaturas do corpo d'água. Entretanto não tiveram recursos financeiros destinados a essas aquisições.

#### **4.1.4 Escolha do local de instalação**

A Plataforma de Coleta de Dados (PCD) necessita de uma área cercada de 10 metros por 10 metros para instalação com garantida segurança e representatividade dos dados medidos.

Foram visitados os três locais pré-definidos para a instalação da PCD e Tanque Classe A, sendo o primeiro a área da Embasa ao lado do açude principal que após análise apresentou as seguintes considerações: (i) por estar muito próxima ao açude sofrerá influência do micro clima provocado pelo espelho d'água, reforçado pela ação dos ventos que trazem a umidade da área molhada para o local analisado, resultando na não representatividade dos parâmetros medidos, principalmente umidade, em relação à área da bacia e a região semi-árida; (ii) a existência do campo de futebol da cidade em frente a área põe em dúvida a segurança dos

equipamentos, uma vez que a euforia inerente a campeonatos e bebidas levam a atitudes impensadas; (iii) a localização da área está em uma via de considerável movimento e bom acesso, ficando sujeita a ações de vandalismo; (iv) como a área está sendo pleiteada para uso perante a Embasa, em termos de garantia de direito de uso para a Universidade apresenta a melhor situação.

A área da Associação do Rio do Cedro (coordenadas  $11^{\circ} 27' 57''$  e  $39^{\circ} 31' 21,7''$ ) tem localização no centro da bacia, indicado para a instalação da PCD por Cadier (1994); fica localizada próxima a um campo de futebol e a uma estrada sem muito movimento segundo moradores; é de propriedade particular onde os moradores necessitam da terra para o cultivo do sisal. Há, também, questões políticas envolvendo a região que põe em dúvida a garantia de direito de uso da área escolhida por um período longo pela Universidade. Esses fatores resultaram numa avaliação desfavorável para tal local.

O terceiro local analisado foi o terreno da Cooperativa Mista dos Produtores de São Domingos – COPESSERTÃO (coordenadas  $11^{\circ} 27' 49,8''$  e  $39^{\circ} 31' 57,8''$ ), que apresenta uma área protegida, cercada, com observador permanente, sem locais de eventos próximos e de grande circulação. Necessita, entretanto, de serviços de limpeza e nivelamento, que foram solicitados à Prefeitura. Apesar da área estar fora do limite da bacia, as variáveis medidas apresentam pequena amplitude de variação espacial, sendo representativa para a região da bacia.

A conclusão foi que a área mais indicada para a instalação da PCD e Tanque Classe A era a da cooperativa, salientando que os critérios de análise abrangeram a segurança dos equipamentos, a garantia de uso da área a longo prazo e a representatividade das variáveis medidas para a região.

A estação climatológica está instalada na sede da Cooperativa Rural dos Produtores de São Domingos – COPERSERTÃO, nas coordenadas geográficas 11°27'49,6'' e 39°31'57,37'', com data de instalação em 28/01/03.

O Tanque Classe A está instalado no mesmo local da estação climatológica, onde estão sendo realizadas medidas às 7 horas e 17 horas. Seu funcionamento foi iniciado em 24/03/03.

A identificação dos locais para instalação dos três pluviômetros seguiu principalmente os critérios de segurança e distribuição espacial para se obter dados representativos de toda a bacia. A área cercada necessária é de 1,5 metros por 1,5 metros. Foi mantido contato com os proprietários para solicitação da permissão de uso e comprometimento da garantia de integridade dos equipamentos, assim como foi feito um termo de cessão para assinatura e confirmação da permissão dada. Esses equipamentos estão instalados conforme relacionado na **Tabela 4**.

**Tabela 4: Coordenadas das estações pluviométricas**

<b>Código da Estação Pluviométrica</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Data de instalação</b>
21 - 9589	11°26'32,2'', 39°30'09''	28/01/03
22 - 9593	11°24'02,9'', 39°31'24,5''	27/01/03
23 - 9591	11°25'52,7'', 39°31'27,16''	27/01/03

A **Figura 19** apresenta a distribuição espacial dos equipamentos instalados na bacia experimental.



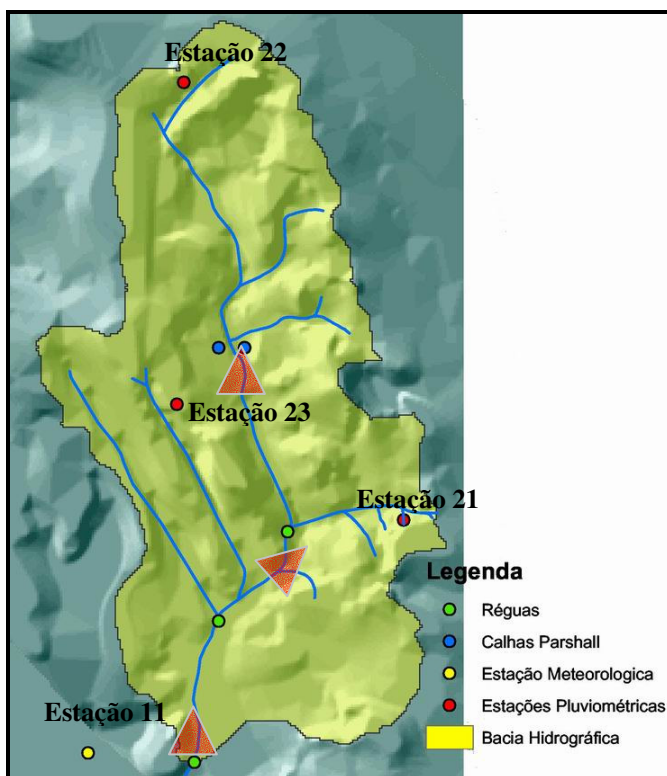


Figura 19: Distribuição espacial dos equipamentos

## 4.2 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

### 4.2.1 Aquisição e tratamento dos dados

Foram realizadas visitas a campo com uma frequência média quinzenal, para coleta dos dados como forma de acompanhar o funcionamento dos equipamentos e realizar as investigações de campo necessárias para a elaboração da caracterização da bacia experimental. Foram utilizados os dados do ano de fevereiro de 2003 até outubro de 2004.

Os dados coletados nos equipamentos foram sistematicamente analisados para controle das medições e identificação de qualquer falha no processo. Assim, foram calculadas médias diárias e mensais das variáveis climatológicas e totais diários e mensais para a precipitação. A vazões não foram determinadas pela impossibilidade de calibração da curva-chave das seções, uma vez que o período de 2002/20003 não apresentou eventos de escoamento e no ano

período de 2003/2004 ocorreu chuvas muito intensas (420 mm em 10 dias) que danificaram o “datalogger” do linigráfo e inundou os dispositivos de medição de vazão Parshall (**Figura 20**). As seções de réguas localizadas a montante dos reservatórios não foram calibradas pela ocorrência de apenas um evento (janeiro de 2004) e falta de experiência da equipe, sendo os dados coletados insuficientes para esse procedimento.



**Figura 20: Calha Parshall 5' danificada**

A qualidade e continuidade dos dados coletados são muito variáveis, devido principalmente a problemas com a operação dos equipamentos e capacitação dos operadores. Por causa de problemas técnicos nos “dataloggers” CR10X e CR510 relativos a defeito de fábrica, foi necessário desinstalar toda a rede para troca de um componente responsável por parte do processamento da CPU principal e, conseqüentemente, foram perdidos dados do pluviógrafo da estação 22 - 9593 por um período de 40 dias e das demais pelo período de conserto dos equipamentos. A rede de medição foi reinstalada no dia 3 de julho de 2003.

No período de 23 de agosto a 4 de outubro de 2003 o datalogger CR10X da estação climatológica voltou a apresentar problemas técnicos, que estão sendo avaliados pelo fabricante, referente à sua memória, o que resultou na perda dos dados registrados nesse período.

Em maio do corrente ano as estações voltaram a apresentar defeitos configurando mais um período de falha até julho de 2004.

#### 4.2.2 Dados coletados

Para a estimativa da evaporação foram utilizados os dados coletados na BHEC no período de fevereiro de 2003 a outubro de 2004.

A temperatura na BHEC apresentou uma média diária de 25,3° C, com amplitude térmica diária de 10,73°C e mensal de 5,9°C para 2003. O dia mais frio deste ano ocorreu no mês de julho, apresentando uma temperatura mínima de 11,91°C e o mais quente ocorreu em dezembro com 36°C. Para o ano de 2004 até o período medido (15 de outubro) obteve-se uma média diária de 24,07°C com amplitude térmica diária de 10,19°C e mensal de 4,10 °C. O dia mais frio deste ano ocorreu no mês de agosto, apresentando uma temperatura mínima de 12,47°C e o mais quente ocorreu em janeiro com 36°C.

A umidade relativa do ar, medida na bacia do rio do Cedro, apresenta-se com uma média anual de 67,93% para 2003, ocorrendo uma variação da média mensal de 59 a 82%, sendo que o mês mais seco foi dezembro, enquanto o mês mais úmido foi julho. Para 2004, a média até o período medido foi de 71,59% com o mês mais úmido sendo junho e o mais seco outubro.

Na região da bacia do rio do Cedro, as velocidades médias diárias do vento variaram em 2003 entre 1,26 a 2,79 m/s, com uma média de 2,09 m/s e atingindo valor máximo de 7,85 m/s. Para 2004, a média até o período medido foi de 1,88 m/s com valores atingindo 6,5m/s. Os meses com menores velocidades de ventos foram, para os dois anos de estudo, maio e junho, e de maiores velocidades foram outubro, novembro e dezembro para 2003, sendo que o ano de 2004 segue essa mesma tendência.

Nos **Gráficos 1 a 4** estão apresentados os dados mensais dessas variáveis climatológicas. A falhas nas linhas dos gráficos representam os períodos que não houve medição.

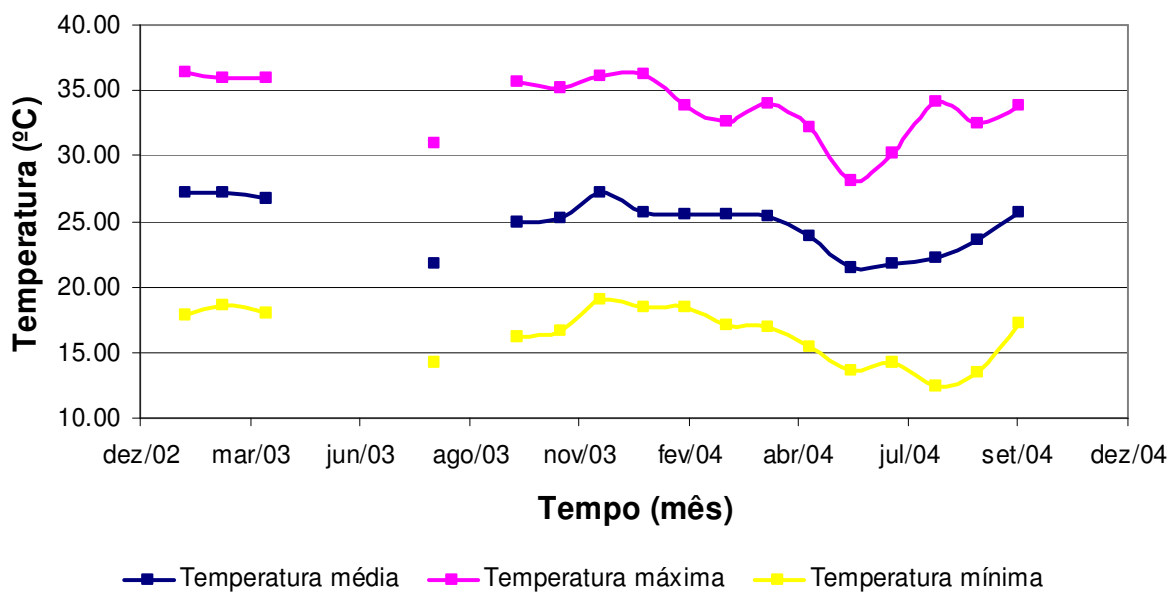


Gráfico 1: Temperatura do ar mensal

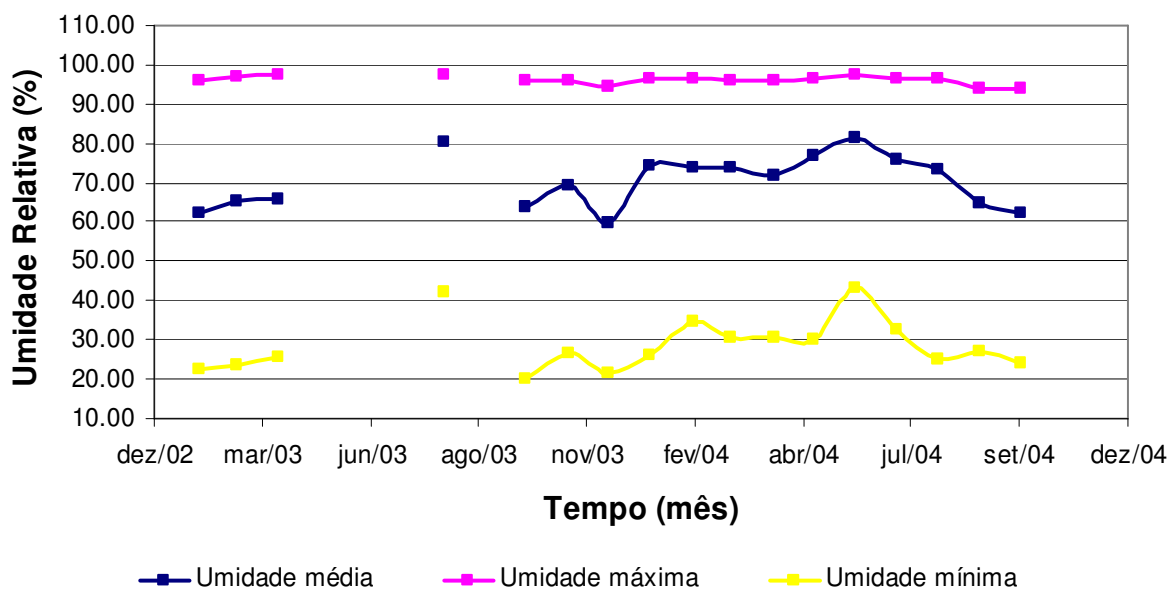


Gráfico 2: Umidade Relativa do ar mensal

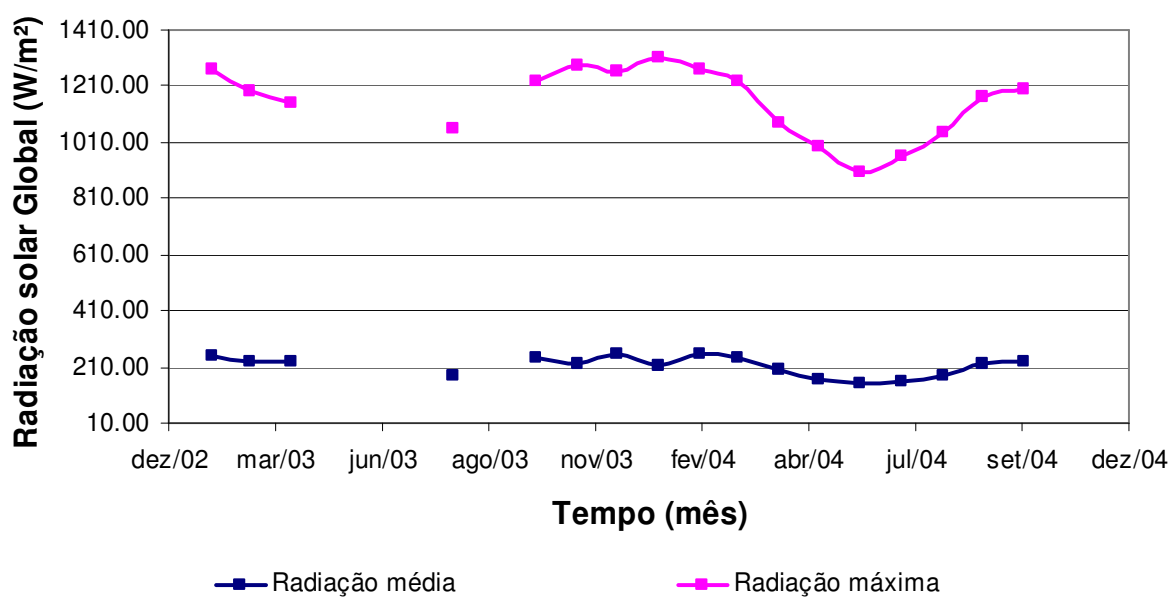


Gráfico 3: Radiação solar global mensal

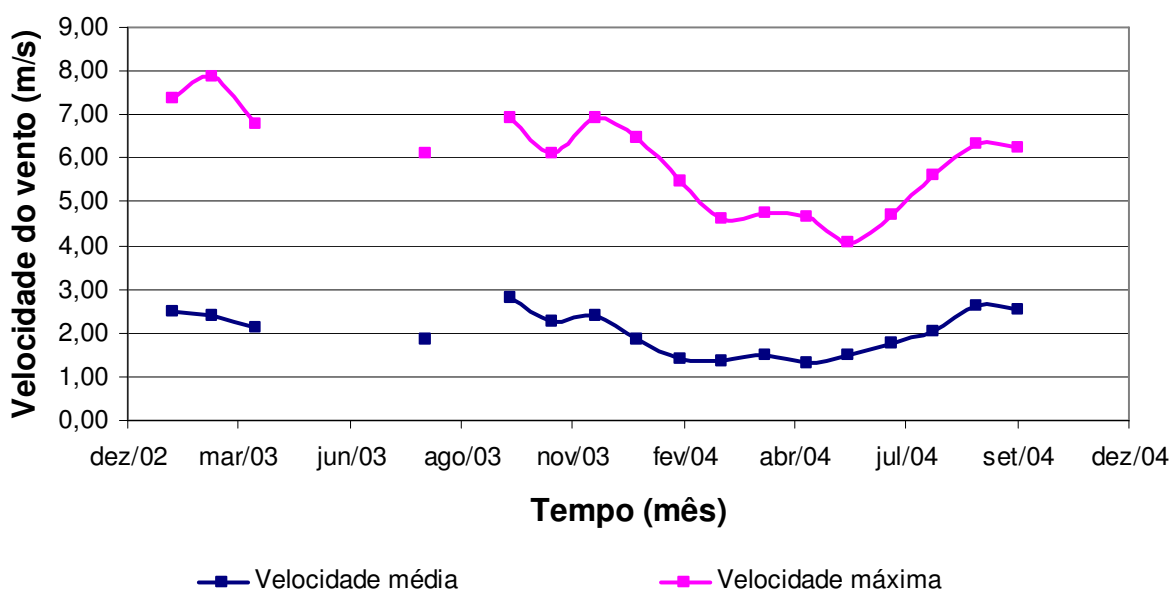


Gráfico 4: Velocidade do vento mensal

### 4.2.3 Cálculo da evaporação

A evaporação foi estimada de acordo com os métodos do Balanço de Energia, Penman, Priestley e Taylor e Morton, apresentados no Capítulo 3.

Como a BHEC dispõe de dados diários das variáveis climatológica, as cálculos foram realizados nessa escala de tempo a exceção do método de Morton, que especifica ser 5 dias o menor período para aplicação da sua formulação.

O primeiro passo foi a definição da radiação líquida comum aos diversos métodos de estimativa de evaporação baseados no balanço de energia. Como na bacia experimental não se tem medição direta de radiação líquida, esta variável foi estimada a partir dos valores de radiação global observados.

➤ *Estimativa da Radiação líquida para os métodos do Balanço de Energia simplificado, de Priestley e Taylor e de Penman*

A radiação líquida foi calculada a partir dos dados de temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e radiação global (W/m<sup>2</sup>) medidas na estação climatológica da BHEC. Essa radiação corresponde a radiação incidente com comprimento de onda curto (R<sub>oc</sub>).

Assim a radiação líquida é calculada com base na **Equação 10**:

$$R_l = (1 - \alpha) R_{oc} - 0,97\sigma T^4 (1 - (A + B\sqrt{e_a})(c + dp))$$

sendo o albedo ( $\alpha$ ) igual a 0,05 e a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma$ ) igual a  $1,19 \cdot 10^{-7}$  cal/cm<sup>2</sup>.dia. A temperatura é expressa em K e a radiação líquida calculada tem unidade de cal/cm.dia. Como a radiação global é medida em W/m<sup>2</sup> foi transformada essa unidade para **cal/cm.dia** com a multiplicação dos valores medidos por 2,06.

A pressão parcial do vapor d'água ( $e_a$ ) é obtida por (**Equação 7**):

$$e_a = \frac{U e_s}{100}$$

onde U é a umidade relativa do ar em % e  $e_s$  é obtido pela seguinte expressão (**Equação 8**):

$$e_s = 4,58 \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}}$$

onde T é a temperatura em °C e  $e_s$  é obtida em mm de Hg.

Como as constantes A, B, c e d não foram ainda calibradas para a área de estudo, são utilizados os valores sugeridos pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) (TUCCI; BELTRAME, 2000) para a região e utilizados no trabalho apresentado por Andrade e Mattos (2001), ficando a **Equação 10** expressa da seguinte forma.:

$$R_l = (1 - \alpha) R_{oc} - \sigma T^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9 p) \quad (66)$$

Como não se tem valores da irradiação p na BHEC, essa variável foi calculada a partir da **Equação 3**:

$$R_{oc} = R_t (a + b \cdot p)$$

sendo utilizando os valores das constantes indicados para clima tropical em Tucci e Beltrame (2000) ( $a = 0,28$  e  $b = 0,48$ ) e, para radiação incidente no topo da atmosfera, os valores tabelados mês a mês para a latitude 12°S do Manual de Meteorologia citado em Tucci e Beltrame (2000), transcritos para a **Tabela 5**.

**Tabela 5: Radiação solar recebida no topo da atmosfera em cal/cm².dia**

Latitude	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
12 S	938	920	867	791	696	661	684	755	838	897	826	832

Os valores encontrados para radiação líquida diária no período de análise estão apresentados na **Tabela 6 e 7** para os anos de 2003 e 2004 respectivamente.

**Tabela 6: Radiação líquida diária em cal/cm.dia – 2003**

<b>Dia</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1	317.03	308.17	321.73	279.05	-	-	295.12	-	-	383.05	321.11
2	315.42	288.76	345.18	276.64	-	-	272.32	-	-	338.20	331.55
3	406.01	355.77	365.92	376.13	-	-	252.54	-	-	309.91	296.14
4	309.30	367.01	342.97	254.11	-	262.25	228.25	-	-	63.85	328.23
5	435.35	377.65	363.26	383.59	-	253.73	276.14	-	372.70	168.33	370.08
6	386.37	381.17	365.48	315.99	-	265.70	304.77	-	274.51	176.41	354.18
7	391.07	338.80	332.75	320.55	-	248.80	307.59	-	409.38	276.90	387.35
8	387.44	345.64	292.86	324.25	-	245.58	247.98	-	386.46	299.33	300.38
9	400.64	376.09	372.04	352.40	-	254.76	312.09	-	331.59	295.11	389.06
10	386.99	324.61	368.41	308.83	-	193.80	275.94	-	378.97	370.43	410.63
11	362.82	346.88	328.58	266.35	-	228.58	210.70	-	403.01	285.00	348.61
12	399.75	428.45	350.60	325.32	-	213.92	283.21	-	415.78	341.91	400.35
13	277.36	331.06	300.40	226.09	-	234.46	240.62	-	423.48	340.42	391.76
14	423.10	342.54	332.58	356.42	-	191.12	217.63	-	357.46	451.66	331.47
15	339.18	343.50	309.68	259.49	-	171.89	317.92	-	244.13	352.61	275.38
16	399.93	327.27	229.98	311.14	-	140.84	259.39	-	169.32	346.65	468.07
17	389.06	408.87	318.98	-	-	197.31	285.04	-	222.97	323.44	344.58
18	354.57	351.94	274.46	-	-	134.73	229.17	-	299.29	350.62	335.53
19	422.17	298.92	349.59	-	-	174.37	156.64	-	417.87	376.01	335.95
20	365.31	318.65	286.92	-	-	227.10	239.31	-	325.87	418.89	349.34
21	405.13	297.01	334.65	-	-	215.18	215.57	-	378.56	402.66	424.56
22	322.08	315.00	331.25	-	-	282.17	300.26	-	390.87	276.87	426.96
23	347.31	287.90	292.36	-	-	246.90	211.69	-	441.55	361.48	301.87
24	307.81	350.48	253.33	-	-	256.73	-	-	281.54	301.22	282.19
25	298.15	360.16	317.99	-	-	266.44	-	-	290.04	287.86	385.92
26	436.32	363.72	297.61	-	-	259.36	-	-	403.11	281.44	369.19
27	449.84	295.59	333.58	-	-	268.46	-	-	400.37	364.98	356.66
28	424.73	275.09	267.17	-	-	253.73	-	-	282.38	330.11	342.63
29		318.13	298.08	-	-	239.77	-	-	329.88	329.02	301.94
30		331.38	286.71	-	-	237.62	-	-	308.70	339.09	328.75
31		352.28		-		257.02	-		423.36		366.44
<b>Média</b>	<b>373.58</b>	<b>338.98</b>	<b>318.84</b>	<b>159.24</b>	<b>-</b>	<b>207.17</b>	<b>191.61</b>	<b>-</b>	<b>302.04</b>	<b>318.11</b>	<b>353.45</b>



**Tabela 7: Radiação líquida diária em cal/cm.dia – 2004**

<b>Dia</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>
1	446.93	399.19	373.07	298.22	177.52	-	213.66	200.98	272.39	286.26
2	420.92	351.28	371.02	346.28	278.22	-	171.46	265.30	300.61	303.47
3	337.84	364.69	405.79	330.48	262.43	-	235.51	266.34	323.02	379.12
4	369.99	395.54	360.45	350.26	208.91	-	181.36	205.79	339.03	375.27
5	398.86	359.96	377.33	323.89	201.51	-	205.99	250.29	287.39	326.03
6	441.30	436.43	420.57	324.43	222.48	-	267.83	217.22	290.86	224.12
7	289.03	421.50	368.50	314.08	283.54	-	233.04	239.22	355.92	250.90
8	367.63	307.91	341.78	316.83	231.19	-	179.09	308.32	307.92	259.28
9	348.67	456.11	361.35	299.63	284.50	-	216.23	260.43	259.34	247.88
10	351.38	441.78	377.62	291.23	256.21	-	264.66	113.02	263.65	396.01
11	219.06	364.50	405.23	270.19	228.25	-	257.66	181.43	287.28	365.09
12	407.32	422.83	393.05	319.52	207.80	-	248.26	258.20	339.69	386.40
13	300.56	429.28	407.78	332.08	155.75	254.88	245.79	286.39	279.55	401.60
14	158.35	445.34	312.17	274.70	231.90	218.22	196.79	217.40	294.68	416.23
15	380.48	365.21	377.18	305.34	246.88	209.21	191.91	227.64	350.96	366.07
16	315.82	405.54	396.45	290.46	270.33	192.82	242.72	264.44	353.90	368.69
17	271.17	350.69	359.77	289.57	215.55	234.38	230.96	266.41	339.62	352.57
18	49.47	407.20	377.73	283.44	231.68	222.67	249.20	246.17	308.36	380.63
19	109.16	389.98	302.80	273.62	224.56	207.92	199.61	220.15	306.08	328.14
20	249.79	348.32	354.10	309.65	267.37	203.34	247.73	222.21	274.64	327.01
21	263.51	383.90	399.93	307.77	187.73	207.96	220.17	208.45	361.76	388.74
22	371.12	410.09	327.25	273.57	171.24	220.53	225.62	302.14	249.47	274.80
23	313.27	414.05	337.26	277.12	240.67	222.16	259.93	293.01	318.79	320.60
24	396.15	415.78	359.68	233.89	256.26	166.01	165.43	328.15	334.59	346.15
25	449.17	342.31	356.61	266.78	262.53	248.74	202.34	307.02	269.89	384.20
26	391.06	361.77	352.24	329.73	276.94	179.69	235.63	282.55	304.06	297.74
27	443.45	443.74	357.01	271.56	280.04	230.35	197.95	288.83	272.37	331.42
28	410.16	363.91	357.96	243.51	257.03	189.24	239.44	325.96	333.15	288.12
29	362.42	246.36	408.55	187.70	241.02	236.39	197.97	302.56	362.71	362.87
30	353.17		341.79	179.84	214.05	159.22	186.39	298.00	319.99	374.13
31	350.00		320.53		230.53		191.51	223.52	-	391.84
<b>Média</b>	<b>333.46</b>	<b>387.76</b>	<b>366.53</b>	<b>290.51</b>	<b>235.63</b>	<b>126.79</b>	<b>219.41</b>	<b>254.11</b>	<b>298.76</b>	<b>338.76</b>

➤ *Cálculo da evaporação pelo método do Balanço de Energia simplificado*

Para o cálculo da evaporação pelo método do Balanço de Energia foi utilizada a equação simplificada do Balanço de Energia (**Equação 19**):

$$LE = \frac{1}{1+B} (R_l - D)$$

A falta de informação dos perfis de temperatura no lago obrigou a realização também das seguintes simplificações:

- 1) a taxa de variação da entalpia da água do lago D, foi desprezada;
- 2) a razão de Bowen  $B$  foi calculada como sendo igual a razão  $\gamma/\Delta$ , partindo do princípio que se uma superfície evaporante recebe uma certa quantidade efetiva de energia radiante (radiação líquida) e que se os armazenamentos forem nulos, no fim de um período, uma fração dessa energia será utilizada em aquecimento do ar adjacente ( $H$ ), e outra em evaporação ( $LE$ ), sendo esta em razão proporcional a  $\gamma/\Delta$ , funções direta da temperatura e umidade do ar, assim como da temperatura da água (VILLA NOVA; REIVCHARDT, 1989). Essa simplificação também foi usada por Andrade e Mattos (2001).

Assim a **Equação 19** fica reduzida a

$$LE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_l) \quad (67)$$

O termo  $\gamma/\Delta$  é obtido pela **Equação 22** constante do método de Penman:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640.10^{\frac{7.5T}{237.3+T}}}{(237.3 + T)^2}$$

O calor latente de evaporação ( $L$ ) assume o valor de 59 cal/cm<sup>2</sup>.mm para transformação da evaporação em lâmina evaporada em milímetros.

Os valores encontrados para evaporação diária no período de análise estão apresentados na **Tabela 8 e 9** para os anos de 2003 e 2004 respectivamente.

**Tabela 8: Evaporação diária em mm - 2003**

<b>Dia</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1	4,04	4,03	4,15	3,60	-	-	3,50	-	-	4,91	4,13
2	4,05	3,71	4,50	3,58	-	-	3,24	-	-	4,40	4,32
3	5,28	4,60	4,79	5,01	-	-	3,00	-	-	4,00	3,83
4	3,95	4,77	4,45	3,13	-	3,08	2,70	-	-	0,76	4,25
5	5,66	4,92	4,74	4,74	-	2,94	3,30	-	4,66	2,01	4,83
6	4,98	4,94	4,80	3,98	-	3,13	3,67	-	3,44	2,12	4,65
7	5,11	4,42	4,41	4,08	-	3,02	3,73	-	5,16	3,44	5,08
8	5,04	4,48	3,83	4,17	-	2,90	2,95	-	4,90	3,76	3,93
9	5,13	4,91	4,91	4,52	-	3,00	3,78	-	4,15	3,74	5,07
10	5,03	4,26	4,85	3,86	-	2,30	3,37	-	4,82	4,72	5,35
11	4,71	4,49	4,30	3,22	-	2,78	2,52	-	5,13	3,53	4,51
12	5,14	5,63	4,63	3,96	-	2,59	3,45	-	5,28	4,31	5,19
13	3,57	4,36	3,94	2,78	-	2,80	2,86	-	5,35	4,34	5,08
14	5,56	4,51	4,34	4,37	-	2,25	2,59	-	4,44	5,83	4,25
15	4,44	4,43	3,99	3,21	-	2,03	3,91	-	3,00	4,47	3,44
16	5,26	4,18	2,86	3,77	-	1,65	3,21	-	2,03	4,42	6,05
17	5,13	5,33	4,08	-	-	2,35	3,56	-	2,73	4,15	4,42
18	4,67	4,56	3,47	-	-	1,54	2,85	-	3,70	4,50	4,27
19	5,52	3,88	4,51	-	-	2,06	1,86	-	5,20	4,77	4,34
20	4,79	4,09	3,61	-	-	2,68	2,88	-	4,06	5,35	4,52
21	5,25	3,85	4,26	-	-	2,52	2,54	-	4,85	5,19	5,49
22	4,17	4,12	4,23	-	-	3,38	3,66	-	5,03	3,45	5,58
23	4,49	3,67	3,70	-	-	2,93	-	-	5,72	4,52	3,98
24	3,89	4,53	3,16	-	-	3,10	-	-	3,62	3,79	3,66
25	3,84	4,69	4,07	-	-	3,24	-	-	3,67	3,66	5,01
26	5,65	4,73	3,80	-	-	3,13	-	-	5,12	3,59	4,81
27	5,88	3,82	4,27	-	-	3,20	-	-	5,02	4,67	4,63
28	5,59	3,48	3,40	-	-	3,03	-	-	3,56	4,21	4,48
29		4,07	3,83	-	-	2,85	-	-	4,15	4,24	3,88
30		4,28	3,71	-	-	2,81	-	-	3,92	4,37	4,27
31		4,57		-		3,07	-		5,41		4,75
<b>Total</b>	<b>135,82</b>	<b>136,30</b>	<b>123,59</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>121,22</b>	<b>142,03</b>

**Tabela 9: Evaporação diária em mm – 2004**

<b>Dia</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>
1	5.84	5.07	4.72	3.84	2.17	-	2.58	2.38	3.36	3.52
2	5.57	4.44	4.72	4.43	3.49	-	2.05	3.21	3.69	3.78
3	4.45	4.58	5.16	4.22	3.27	-	2.79	3.20	3.92	4.78
4	4.86	5.02	4.60	4.46	2.57	-	2.16	2.38	4.12	4.78
5	5.20	4.50	4.72	4.15	2.48	-	2.49	2.97	3.49	4.12
6	5.73	5.56	5.27	4.15	2.76	-	3.28	2.61	3.54	2.84
7	3.64	5.39	4.62	4.01	3.58	-	2.83	2.90	4.38	3.22
8	4.76	3.86	4.22	4.09	2.88	-	2.17	3.82	3.74	3.28
9	4.57	5.82	4.55	3.87	3.55	-	2.67	3.21	3.20	3.08
10	4.59	5.61	4.76	3.73	3.18	-	3.32	1.32	3.19	5.07
11	2.72	4.60	5.13	3.46	2.85	-	3.23	2.11	3.56	4.66
12	5.23	5.35	5.01	4.10	2.59	-	3.04	3.01	4.19	4.92
13	3.84	5.41	5.21	4.31	1.91	3.12	3.02	3.33	3.44	5.07
14	1.96	5.64	3.96	3.49	2.93	2.65	2.35	2.55	3.64	5.34
15	4.89	4.64	4.81	3.83	3.13	2.53	2.30	2.70	4.39	4.69
16	3.98	5.23	5.07	3.68	3.38	2.33	2.91	3.16	4.41	4.64
17	3.44	4.51	4.62	3.67	2.67	2.82	2.80	3.18	4.23	4.47
18	0.60	5.21	4.86	3.58	2.88	2.69	3.05	3.01	3.85	4.83
19	1.30	4.94	3.87	3.49	2.80	2.52	2.39	2.67	3.79	4.23
20	3.06	4.41	4.52	3.94	3.32	2.45	3.01	2.71	3.43	4.21
21	3.25	4.90	5.13	3.91	2.26	2.52	2.66	2.49	4.52	4.99
22	4.73	5.22	4.19	3.44	2.08	2.62	2.68	3.70	3.11	3.43
23	3.94	5.31	4.34	3.48	2.99	2.62	3.06	3.64	3.97	4.03
24	5.04	5.35	4.63	2.88	3.20	1.90	1.92	4.13	4.17	4.39
25	5.72	4.39	4.56	3.35	3.24	2.96	2.39	3.77	3.36	4.92
26	4.97	4.59	4.44	4.22	3.43	2.15	2.76	3.46	3.78	3.86
27	5.66	5.74	4.55	3.45	3.49	2.78	2.32	3.61	3.35	4.26
28	5.22	4.65	4.57	3.04	3.23	2.25	2.83	4.11	4.19	3.74
29	4.49	3.03	5.19	2.28	3.00	2.86	2.34	3.86	4.60	4.68
30	4.45		4.33	2.16	2.62	1.88	2.24	3.78	4.05	4.82
31	4.38		4.07		2.83		2.30	2.73		5.04
<b>Total</b>	<b>132.08</b>	<b>142.98</b>	<b>144.39</b>	<b>110.72</b>	<b>90.75</b>	<b>Falha</b>	<b>81.95</b>	<b>95.73</b>	<b>114.66</b>	<b>133.67</b>

➤ *Cálculo da evaporação pelo método de Penman*

A expressão de Penman para cálculo da evaporação, em mm, é a seguinte (**Equação 20**) :

$$E_p = \frac{\frac{\Delta}{\gamma L} \cdot R_l + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

onde a radiação líquida disponível ( $R_l$ ) e a relação entre a tangente à curva de saturação do vapor ( $\Delta$ ) e a constante psicrométrica de Bowen ( $\gamma$ ) já foram calculadas e  $E_a$ , o poder evaporante do ar à sombra expressa em função da velocidade do vento a 2 m de altura da superfície da água e do déficit de pressão de vapor, é calculada pela **Equação 23**.

$$E_a = 0,35 \cdot \left(0,5 + \frac{w_2}{160}\right) \cdot (e_s - e_a)$$

Sendo que  $e_s$  e  $e_a$  foram calculados para o método do Balanço de Energia simplificado e  $w_2$  é estimado a partir do dado de velocidade do vento medido na estação climatológica a 3 metros de altura. Essa correção foi feita utilizando uma extrapolação logarítmica (TUCCI; BELTRAME, 2000), ou seja:

$$w_2 = w_h \cdot \frac{\log(200/2)}{\log(100h)} \quad (68)$$

onde  $h$  é a altura onde foi medida a velocidade do vento, no caso da BHEC  $h$  é igual a 3.

Os valores encontrados para evaporação diária no período de análise estão apresentados na **Tabela 10 e 11** para os anos de 2003 e 2004 respectivamente.

**Tabela 10: Evaporação diária em mm - 2003**

<b>Dia</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1	4,88	5,63	5,05	4,32	-	-	3,95	-	-	6,27	5,34
2	5,11	4,68	5,73	4,22	-	-	3,67	-	-	5,78	5,56
3	6,73	5,82	6,12	5,92	-	-	3,41	-	-	4,91	4,95
4	4,92	6,26	5,68	3,94	-	3,63	2,99	-	-	0,96	5,40
5	7,14	6,34	5,85	5,74	-	3,36	3,73	-	5,73	2,39	6,03
6	6,27	6,19	5,90	4,87	-	3,58	4,28	-	4,32	2,51	6,08
7	6,68	5,84	5,63	4,83	-	3,61	4,28	-	6,38	3,94	6,30
8	6,53	5,92	5,00	5,15	-	3,42	3,34	-	6,45	4,25	5,54
9	6,30	6,45	6,58	5,40	-	3,53	4,38	-	5,35	4,44	6,56
10	6,33	5,60	6,35	5,08	-	2,78	3,98	-	6,16	5,84	7,09
11	6,05	5,77	5,51	4,53	-	3,17	3,01	-	6,44	4,08	6,12
12	6,29	7,00	6,14	5,05	-	3,04	4,06	-	6,51	5,18	6,73
13	4,62	5,74	5,36	3,66	-	3,25	3,35	-	6,72	5,11	6,61
14	7,22	6,09	5,63	5,36	-	2,55	2,93	-	5,47	7,00	5,43
15	6,00	5,57	5,06	4,42	-	2,28	4,58	-	4,69	5,49	4,01
16	6,86	4,92	3,40	4,83	-	1,85	3,79	-	2,85	5,45	7,34
17	6,56	6,39	5,04	-	-	2,66	4,28	-	4,11	5,19	5,62
18	6,09	5,91	4,32	-	-	1,67	3,77	-	4,90	5,69	5,52
19	6,80	5,36	5,65	-	-	2,40	2,16	-	6,50	5,82	5,79
20	6,40	5,16	4,23	-	-	3,17	3,57	-	5,01	6,59	5,98
21	6,59	4,93	5,34	-	-	2,83	2,75	-	6,19	6,72	6,95
22	5,45	5,42	5,50	-	-	4,07	4,04	-	6,54	4,27	6,92
23	5,79	4,36	4,66	-	-	3,27	-	-	7,52	5,44	5,53
24	4,79	5,53	3,65	-	-	3,62	-	-	5,07	4,75	4,92
25	4,99	6,02	5,05	-	-	3,83	-	-	4,96	4,66	6,56
26	7,11	5,89	4,69	-	-	3,70	-	-	6,77	4,65	6,75
27	7,60	4,77	5,29	-	-	3,69	-	-	6,37	6,01	6,09
28	7,41	4,10	4,24	-	-	3,55	-	-	4,80	5,37	6,14
29		4,82	4,79	-	-	3,26	-	-	5,43	5,77	5,00
30		5,25	4,90	-	-	3,10	-	-	5,18	5,83	5,74
31		5,59		-		3,54	-		6,87		6,28
<b>Total</b>	<b>173,51</b>	<b>173,33</b>	<b>156,37</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>150,36</b>	<b>184,87</b>

**Tabela 11: Evaporação diária em mm – 2004**

Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
1	7.16	5.79	5.16	4.55	2.38	-	2.91	2.71	4.70	4.54
2	7.10	5.12	5.18	5.22	4.12	-	2.29	3.72	4.95	4.87
3	5.98	5.17	5.58	5.01	3.87	-	3.25	3.89	4.97	5.85
4	6.71	5.67	5.26	5.27	2.87	-	2.44	2.70	5.06	6.08
5	7.00	4.92	5.26	5.00	2.78	-	2.87	3.40	4.54	5.41
6	7.40	6.11	5.73	4.85	3.15	-	3.83	3.15	4.58	3.78
7	4.52	5.89	5.12	4.71	4.19	-	3.34	3.43	5.62	4.22
8	5.95	4.20	4.55	4.90	3.34	-	2.53	4.46	4.95	4.29
9	6.11	6.49	5.01	4.77	4.06	-	3.10	4.09	4.60	3.60
10	5.78	6.27	5.30	4.40	3.79	-	4.04	1.75	4.07	6.24
11	2.98	5.16	5.57	4.14	3.47	-	4.01	2.69	4.74	5.93
12	5.95	5.98	5.51	4.87	3.14	-	3.81	3.72	5.37	6.63
13	4.36	6.07	5.75	5.32	2.13	3.66	3.96	4.24	4.62	6.46
14	2.25	6.34	4.39	4.25	3.40	3.11	2.71	3.29	4.73	6.83
15	5.59	5.12	5.34	4.53	3.76	2.89	2.77	3.43	5.65	6.29
16	4.32	5.88	5.64	4.38	3.96	2.70	3.42	3.84	5.72	6.07
17	3.90	5.16	5.23	4.34	3.14	3.35	3.35	3.83	5.49	5.99
18	0.70	5.99	5.76	4.27	3.35	3.17	3.74	3.86	5.13	6.21
19	1.42	5.57	4.56	4.30	3.35	3.07	2.89	3.40	4.89	5.69
20	3.26	4.99	5.37	4.76	3.96	2.91	3.58	3.49	4.81	5.71
21	3.44	5.70	5.98	4.85	2.59	3.10	3.35	3.06	5.84	6.83
22	5.42	6.04	4.81	4.17	2.39	2.95	3.79	4.47	4.24	4.47
23	4.44	6.04	4.98	4.13	3.54	3.12	4.19	4.40	5.09	5.01
24	5.71	6.09	5.37	3.18	3.97	2.09	2.64	5.13	5.47	5.43
25	6.47	5.09	5.51	3.78	3.81	3.45	3.32	4.80	4.61	6.27
26	5.59	5.22	5.06	4.86	4.01	2.50	3.65	4.43	4.93	5.37
27	6.49	6.52	5.36	4.07	4.13	3.26	3.01	4.82	4.25	5.58
28	5.99	5.33	5.39	3.55	4.01	2.52	3.59	5.00	5.41	4.99
29	4.90	3.29	6.07	2.61	3.70	3.38	3.09	4.75	5.89	6.48
30	4.91	-	5.06	2.47	3.03	2.05	2.95	4.97	5.48	6.58
31	4.90	-	4.70	-	3.36	-	2.76	3.62		6.73
<b>Total</b>	<b>156.71</b>	<b>161.21</b>	<b>163.54</b>	<b>131.50</b>	<b>106.75</b>	<b>Falha</b>	<b>101.16</b>	<b>118.55</b>	<b>150.38</b>	<b>174.45</b>

➤ *Cálculo da evaporação pelo método de Priestley e Taylor*

A equação utilizada é:

$$E_{PT} = \alpha_e \frac{\Delta_0}{\Delta_0 + \gamma} \cdot \frac{R_l - D}{L} \quad (24)$$

A ausência de dados de temperatura da água provocou as mesmas simplificações e considerações realizadas para o Balanço de Energia simplificado, D é desprezado e a temperatura da água é substituída pela temperatura do ar. O coeficiente  $\alpha_e$  é igual a 1,26.

Essas simplificações resultam na multiplicação dos valores encontrados para evaporações diárias pelo método do Balanço de Energia simplificado pelo coeficiente  $\alpha_e$ .

Os valores encontrados para evaporação diária no período de análise estão apresentados na **Tabela 12 e 13** para os anos de 2003 e 2004 respectivamente.

**Tabela 12: Evaporação diária em mm – 2003**

<b>Dia</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
1	5,09	5,08	5,23	4,53	-	-	4,41	-	-	6,18	5,21
2	5,10	4,67	5,68	4,51	-	-	4,08	-	-	5,54	5,44
3	6,65	5,79	6,04	6,31	-	-	3,78	-	-	5,03	4,83
4	4,98	6,01	5,61	3,94	-	3,89	3,40	-	-	0,96	5,35
5	7,14	6,20	5,97	5,98	-	3,71	4,16	-	5,87	2,54	6,08
6	6,28	6,23	6,05	5,02	-	3,94	4,63	-	4,33	2,68	5,86
7	6,44	5,56	5,55	5,14	-	3,80	4,69	-	6,50	4,33	6,40
8	6,35	5,65	4,82	5,26	-	3,66	3,72	-	6,17	4,74	4,95
9	6,47	6,19	6,19	5,70	-	3,78	4,76	-	5,23	4,71	6,38
10	6,34	5,37	6,11	4,87	-	2,90	4,24	-	6,08	5,94	6,74
11	5,93	5,66	5,42	4,05	-	3,50	3,18	-	6,46	4,45	5,69
12	6,48	7,09	5,83	4,99	-	3,27	4,35	-	6,65	5,43	6,54
13	4,50	5,50	4,96	3,50	-	3,52	3,60	-	6,74	5,47	6,40
14	7,00	5,68	5,47	5,50	-	2,84	3,26	-	5,59	7,34	5,36
15	5,60	5,58	5,02	4,05	-	2,55	4,93	-	3,79	5,63	4,33
16	6,62	5,27	3,60	4,75	-	2,07	4,05	-	2,56	5,57	7,62
17	6,46	6,71	5,14	-	-	2,96	4,49	-	3,44	5,22	5,57
18	5,88	5,74	4,38	-	-	1,94	3,60	-	4,66	5,67	5,38
19	6,96	4,89	5,68	-	-	2,59	2,34	-	6,55	6,01	5,47
20	6,04	5,15	4,55	-	-	3,38	3,62	-	5,11	6,74	5,70
21	6,62	4,85	5,37	-	-	3,17	3,20	-	6,11	6,54	6,92
22	5,25	5,19	5,33	-	-	4,26	4,62	-	6,34	4,35	7,04
23	5,66	4,63	4,67	-	-	3,69	-	-	7,21	5,70	5,01
24	4,90	5,71	3,98	-	-	3,91	-	-	4,56	4,78	4,61
25	4,84	5,91	5,13	-	-	4,08	-	-	4,63	4,61	6,32
26	7,12	5,96	4,79	-	-	3,94	-	-	6,45	4,52	6,07
27	7,40	4,81	5,38	-	-	4,04	-	-	6,32	5,89	5,83
28	7,04	4,39	4,28	-	-	3,82	-	-	4,49	5,30	5,64
29	-	5,13	4,82	-	-	3,59	-	-	5,23	5,35	4,89
30	-	5,39	4,67	-	-	3,55	-	-	4,94	5,51	5,38
31	-	5,75	-	-	-	3,87	-	-	6,82	-	5,99
<b>Total</b>	<b>171,14</b>	<b>171,74</b>	<b>155,73</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>Falha</b>	<b>152,74</b>	<b>178,96</b>



**Tabela 13: Evaporação diária em mm – 2004**

Dia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
1	7.36	6.39	5.94	4.84	2.74	-	3.26	3.00	4.23	4.43
2	7.02	5.59	5.94	5.58	4.40	-	2.58	4.04	4.65	4.76
3	5.61	5.78	6.50	5.32	4.12	-	3.52	4.04	4.94	6.03
4	6.13	6.33	5.80	5.61	3.23	-	2.72	3.00	5.20	6.02
5	6.56	5.67	5.95	5.23	3.12	-	3.13	3.74	4.40	5.19
6	7.21	7.01	6.64	5.22	3.48	-	4.13	3.29	4.46	3.57
7	4.59	6.79	5.82	5.05	4.51	-	3.57	3.65	5.52	4.06
8	6.00	4.86	5.32	5.16	3.63	-	2.74	4.81	4.71	4.13
9	5.76	7.34	5.73	4.87	4.47	-	3.36	4.05	4.03	3.88
10	5.79	7.07	6.00	4.70	4.01	-	4.19	1.66	4.01	6.38
11	3.43	5.80	6.46	4.37	3.59	-	4.07	2.66	4.48	5.87
12	6.59	6.75	6.31	5.17	3.26	-	3.83	3.80	5.28	6.20
13	4.83	6.82	6.56	5.43	2.40	3.93	3.80	4.20	4.33	6.39
14	2.47	7.11	5.00	4.40	3.69	3.34	2.96	3.21	4.59	6.73
15	6.16	5.84	6.06	4.83	3.95	3.19	2.90	3.40	5.53	5.91
16	5.01	6.59	6.39	4.64	4.26	2.93	3.67	3.98	5.55	5.84
17	4.34	5.69	5.82	4.62	3.36	3.56	3.53	4.01	5.33	5.64
18	0.76	6.57	6.13	4.51	3.62	3.39	3.85	3.80	4.85	6.08
19	1.64	6.23	4.88	4.39	3.53	3.18	3.01	3.36	4.77	5.33
20	3.85	5.55	5.69	4.97	4.18	3.08	3.79	3.42	4.32	5.30
21	4.10	6.17	6.46	4.92	2.85	3.17	3.36	3.14	5.70	6.29
22	5.96	6.58	5.28	4.33	2.62	3.30	3.37	4.66	3.92	4.32
23	4.96	6.69	5.46	4.39	3.76	3.31	3.85	4.58	5.00	5.08
24	6.35	6.74	5.83	3.63	4.03	2.40	2.41	5.20	5.26	5.53
25	7.20	5.53	5.75	4.22	4.08	3.73	3.01	4.75	4.23	6.20
26	6.26	5.78	5.60	5.32	4.32	2.71	3.48	4.36	4.76	4.86
27	7.13	7.23	5.73	4.34	4.39	3.50	2.93	4.55	4.22	5.37
28	6.57	5.86	5.76	3.83	4.07	2.84	3.56	5.18	5.28	4.71
29	5.66	3.81	6.54	2.88	3.78	3.60	2.95	4.86	5.80	5.90
30	5.61	-	5.45	2.73	3.31	2.36	2.82	4.76	5.10	6.07
31	5.51	-	5.13	-	3.57	-	2.89	3.44	-	6.35
<b>Total</b>	<b>166.42</b>	<b>180.15</b>	<b>181.93</b>	<b>139.51</b>	<b>114.34</b>	<b>Falha</b>	<b>103.26</b>	<b>120.62</b>	<b>144.47</b>	<b>168.42</b>

➤ *Cálculo da evaporação pelo método de Morton – Relação Complementar*

Para a estimativa de evaporação em reservatórios com base no conceito de relação complementar foram seguidos os procedimentos, propostos em Morton (1983a):

- ✓ cálculo da relação entre a pressão atmosférica na estação climatológica de medição e a pressão ao nível do mar ( $p/p_s$ ) dada por:

$$p/p_s = \left[ \frac{(288 - 0,0065H)}{288} \right]^{5,256}$$

onde H é a altitude em metros no local da estação climatológica, que no caso da BHEC é 295 m. Logo:

$$p/p_s = 0,965$$

- ✓ cálculo dos ângulos e funções relacionadas à estimativa da radiação global no topo da atmosfera (GE) em W/m<sup>2</sup>:

Para esse cálculo é necessário como dado de entrada apenas a latitude do local da estação climatológica e a definição do período que se quer calcular a evaporação (mensal, semanal, diária). A latitude da estação do projeto é 11,46° Sul.

Como o período escolhido para estimativa foi de 5 dias por ser o menor período indicado por Morton (1983a), uma vez que para valores diários compromete a representatividade dos resultados, foi feita a correção do índice *i* que corresponde ao número do mês em análise pela

**Equação 36:**

$$i = \frac{[I + 0,5 \cdot (m - 1)]}{m}$$

onde foi adotado *m* igual a 6 e *I* variou de 1 para o primeiro período de janeiro a 72 para o último período em dezembro.

Morton (1983a) orienta que a estrutura mensal deve ser mantida, ou seja, os primeiros períodos do mês devem ter o mesmo número de dias e o último período deve ter o número de dias necessários para completar o mês, não sendo indicado juntar os últimos dias de um mês com os primeiros dias do mês subsequente para completar o período de 5 dias. Dessa forma apesar do período de cálculo base para a evaporação por esse método ser 5 dias na presente pesquisa, houve períodos com 3 dias para satisfazer a essa orientação metodológica. Como o resultado refere-se a uma média diária da evaporação nesse intervalo de tempo, não é cometido erro de na estimativa da evaporação devido a essa diferença nos intervalos.

A partir desses dados foram calculados  $\theta$ , a declinação do sol em graus;  $Z$ , o ângulo zenital ao meio dia;  $z$ , ângulo zenital médio diário;  $\varpi$  os graus de rotação da Terra entre o nascer do sol e o meio dia; e  $\eta$  a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol, para então ser estimada da radiação global no topo da atmosfera (GE) em  $W/m^2$ .

As formulações usadas foram as **Equações de 29 a 35**, com a constante da **Equação 29** passando a ser igual a 23,4 por ser uma análise para período menor que mensal. Os valores obtidos para o período de um ano referente a BHEC estão apresentado na **Tabela 14**.

**Tabela 14: Estimativa da radiação global no topo da atmosfera (GE) em  $W/m^2$**

Período	I	i	$\theta$ °C	cos Z	cos w	sen w	cos z	n	w	Ge $W/m^2$
1-jan a 5-jan	1	0,583	-22,781	0,981	-0,085	0,996	0,683	0,983	94,884	504,363
6-jan a 10-jan	2	0,750	-22,239	0,982	-0,083	0,997	0,683	0,983	94,755	503,463
11-jan a 15-jan	3	0,917	-21,533	0,985	-0,080	0,997	0,683	0,984	94,588	502,137
16-jan a 20-jan	4	1,083	-20,669	0,987	-0,076	0,997	0,682	0,984	94,386	500,349
21-jan a 25-jan	5	1,250	-19,653	0,990	-0,072	0,997	0,682	0,984	94,152	498,061
26-jan a 31-jan	6	1,417	-18,492	0,992	-0,068	0,998	0,680	0,985	93,888	495,232
1-fev a 5-fev	7	1,583	-17,195	0,995	-0,063	0,998	0,679	0,986	93,597	491,822
6-fev a 10-fev	8	1,750	-15,771	0,997	-0,057	0,998	0,676	0,986	93,282	487,793
11-fev a 15-fev	9	1,917	-14,232	0,999	-0,051	0,999	0,674	0,987	92,947	483,113
16-fev a 20-fev	10	2,083	-12,587	1,000	-0,045	0,999	0,670	0,988	92,594	477,757
21-fev a 25-fev	11	2,250	-10,850	1,000	-0,039	0,999	0,666	0,989	92,227	471,711
26-fev a 28-fev	12	2,417	-9,033	0,999	-0,032	0,999	0,660	0,991	91,847	464,971
1-mar a 5-mar	13	2,583	-7,150	0,997	-0,025	1,000	0,654	0,992	91,457	457,549
6-mar a 10-mar	14	2,750	-5,214	0,994	-0,018	1,000	0,647	0,993	91,060	449,471
11-mar a 15-mar	15	2,917	-3,240	0,990	-0,011	1,000	0,639	0,994	90,658	440,778
16-mar a 20-mar	16	3,083	-1,242	0,984	-0,004	1,000	0,630	0,996	90,252	431,528
21-mar a 25-mar	17	3,250	0,766	0,977	0,003	1,000	0,623	0,997	89,845	423,257
26-mar a 31-mar	18	3,417	2,767	0,969	0,010	1,000	0,618	0,998	89,439	416,907
1-abr a 5-abr	19	3,583	4,749	0,960	0,017	1,000	0,612	1,000	89,035	410,157
6-abr a 10-abr	20	3,750	6,695	0,950	0,024	1,000	0,606	1,001	88,636	403,085
11-abr a 15-abr	21	3,917	8,592	0,939	0,031	1,000	0,600	1,003	88,245	395,781
16-abr a 20-abr	22	4,083	10,426	0,928	0,037	0,999	0,592	1,004	87,862	388,345
21-abr a 25-abr	23	4,250	12,183	0,916	0,044	0,999	0,585	1,006	87,492	380,882
26-abr a 30-abr	24	4,417	13,850	0,904	0,050	0,999	0,578	1,007	87,135	373,499
1-mai a 5-mai	25	4,583	15,416	0,892	0,056	0,998	0,570	1,008	86,795	366,306
6-mai a 10-mai	26	4,750	16,868	0,880	0,061	0,998	0,563	1,009	86,476	359,412
11-mai a 15-mai	27	4,917	18,196	0,869	0,067	0,998	0,556	1,010	86,179	352,920
16-mai a 20-mai	28	5,083	19,390	0,859	0,071	0,997	0,549	1,012	85,908	346,927
21-mai a 25-mai	29	5,250	20,441	0,849	0,076	0,997	0,543	1,013	85,667	341,525
26-mai a 31-mai	30	5,417	21,342	0,841	0,079	0,997	0,538	1,013	85,457	336,794
1-jun a 5-jun	31	5,583	22,086	0,833	0,082	0,997	0,534	1,014	85,281	332,804
6-jun a 10-jun	32	5,750	22,667	0,828	0,085	0,996	0,530	1,015	85,143	329,613
11-jun a 15-jun	33	5,917	23,082	0,824	0,086	0,996	0,528	1,016	85,044	327,266
16-jun a 20-jun	34	6,083	23,327	0,821	0,087	0,996	0,526	1,016	84,985	325,797
21-jun a 25-jun	35	6,250	23,399	0,821	0,088	0,996	0,526	1,016	84,967	325,225

Período		I	i	$\theta$ °C	cos Z	cos w	sen w	cos z	n	w	Ge W/m <sup>2</sup>
26-jun a	30-jun	36	6,417	23,300	0,822	0,087	0,996	0,526	1,017	84,991	325,554
1-jul a	5-jul	37	6,583	23,030	0,824	0,086	0,996	0,528	1,017	85,056	326,777
6-jul a	10-jul	38	6,750	22,589	0,829	0,084	0,996	0,531	1,017	85,162	328,873
11-jul a	15-jul	39	6,917	21,983	0,834	0,082	0,997	0,534	1,017	85,306	331,806
16-jul a	20-jul	40	7,083	21,215	0,842	0,079	0,997	0,539	1,016	85,487	335,530
21-jul a	25-jul	41	7,250	20,290	0,850	0,075	0,997	0,544	1,016	85,702	339,985
26-jul a	31-jul	42	7,417	19,217	0,860	0,071	0,998	0,550	1,015	85,948	345,102
1-ago a	5-ago	43	7,583	18,002	0,871	0,066	0,998	0,557	1,015	86,223	350,799
6-ago a	10-ago	44	7,750	16,654	0,882	0,061	0,998	0,564	1,014	86,523	356,988
11-ago a	15-ago	45	7,917	15,184	0,894	0,055	0,998	0,571	1,013	86,846	363,573
16-ago a	20-ago	46	8,083	13,602	0,906	0,049	0,999	0,579	1,012	87,188	370,453
21-ago a	25-ago	47	8,250	11,920	0,918	0,043	0,999	0,586	1,011	87,547	377,525
26-ago a	31-ago	48	8,417	10,151	0,930	0,036	0,999	0,594	1,010	87,920	384,684
1-set a	5-set	49	8,583	8,306	0,941	0,030	1,000	0,601	1,009	88,304	391,826
6-set a	10-set	50	8,750	6,401	0,952	0,023	1,000	0,607	1,008	88,697	398,852
11-set a	15-set	51	8,917	4,448	0,962	0,016	1,000	0,613	1,007	89,096	405,669
16-set a	20-set	52	9,083	2,463	0,971	0,009	1,000	0,619	1,005	89,500	412,193
21-set a	25-set	53	9,250	0,459	0,978	0,002	1,000	0,623	1,004	89,907	418,349
26-set a	30-set	54	9,417	-1,547	0,985	-0,005	1,000	0,632	1,002	90,314	427,019
1-out a	5-out	55	9,583	-3,543	0,990	-0,013	1,000	0,640	1,001	90,719	436,111
6-out a	10-out	56	9,750	-5,512	0,995	-0,020	1,000	0,648	1,000	91,121	444,690
11-out a	15-out	57	9,917	-7,441	0,998	-0,026	1,000	0,655	0,998	91,517	452,704
16-out a	20-out	58	10,083	-9,315	0,999	-0,033	0,999	0,661	0,997	91,906	460,117
21-out a	25-out	59	10,250	-11,121	1,000	-0,040	0,999	0,666	0,995	92,284	466,904
26-out a	31-out	60	10,417	-12,844	1,000	-0,046	0,999	0,671	0,994	92,649	473,056
1-nov a	5-nov	61	10,583	-14,473	0,999	-0,052	0,999	0,674	0,993	93,000	478,576
6-nov a	10-nov	62	10,750	-15,996	0,997	-0,058	0,998	0,677	0,991	93,332	483,478
11-nov a	15-nov	63	10,917	-17,401	0,995	-0,064	0,998	0,679	0,990	93,643	487,784
16-nov a	20-nov	64	11,083	-18,678	0,992	-0,069	0,998	0,681	0,989	93,930	491,524
21-nov a	25-nov	65	11,250	-19,817	0,989	-0,073	0,997	0,682	0,988	94,189	494,732
26-nov a	30-nov	66	11,417	-20,811	0,987	-0,077	0,997	0,682	0,987	94,419	497,444
1-dez a	5-dez	67	11,583	-21,651	0,984	-0,080	0,997	0,683	0,986	94,616	499,693
6-dez a	10-dez	68	11,750	-22,332	0,982	-0,083	0,997	0,683	0,985	94,777	501,514
11-dez a	15-dez	69	11,917	-22,849	0,980	-0,085	0,996	0,683	0,985	94,900	502,934
16-dez a	20-dez	70	12,083	-23,198	0,979	-0,087	0,996	0,683	0,984	94,984	503,975
21-dez a	25-dez	71	12,250	-23,375	0,978	-0,088	0,996	0,683	0,984	95,027	504,651
26-dez a	31-dez	72	12,417	-23,381	0,978	-0,088	0,996	0,683	0,984	95,028	504,968

Para continuação da estimativa de evaporação pelo método de Morton foram realizadas as seguintes etapas:

- ✓ Cálculo do vapor d'água precipitável ( $W$ ) em milímetros e do coeficiente de turbidez ( $j$ ) obtidos em função de  $z$ , da temperatura do ar e da relação  $p/ps$ .

- ✓ Cálculo da transmitância de céu claro  $\tau$  e suas frações absorvidas  $\tau_a$  dadas em função do vapor d'água precipitável ( $W$ ) em milímetros e do coeficiente de turbidez ( $j$ ), da relação  $p/ps$  e de  $z$ .
- ✓ Cálculo da radiação global para céu claro ( $G_o$ ) e estimativa da radiação global incidente ( $G$ ), onde  $\alpha$ , o albedo da água, foi considerado com valor constante igual a 0,05; e  $S$  foi calculada em função das medidas de radiação global incidente ( $G$ ).
- ✓ cálculo de  $e_D$ , a pressão de saturação do vapor na temperatura média do ponto de orvalho  $T_D$  em mbar, de  $e_s$ , pressão de saturação do vapor na temperatura do ar  $T$  em mbar e  $\Delta$ , a tangente da curva de pressão de saturação do vapor em função de  $T$ , expressa em mbar/°C
- ✓ Estimativa do incremento proporcional da radiação atmosférica devido a presença de nuvens ( $\rho$ ) em função da insolação  $S$ , da relação  $p/ps$  e da relação  $ea/es$ .
- ✓ Cálculo da radiação líquida de ondas longas perdida para a superfície ( $B$ ).
- ✓ Estimativa da radiação líquida ( $R_w$ ), do fator de estabilidade ( $\xi$ ), do coeficiente de transferência de vapor ( $fT$ ) e do coeficiente de transferência de calor sensível ( $\lambda$ ), onde  $b_o$  é igual 1,12,  $\gamma_p = (\gamma_{ps})(p/ps)$  e  $fz$  e  $\gamma_{ps}$  são 25 W/m<sup>2</sup>mbar e 0,66 mbar/°C.
- ✓ Estimativa da temperatura de equilíbrio  $T_p$  obtida convergindo iterativamente as equações. Para tanto foi utilizada ferramenta disponível na planilha eletrônica do aplicativo Excell da Microsoft denominada "Atingir meta". Esse método é utilizado para encontrar o valor de entrada que uma fórmula precisa para produzir um determinado resultado. Ao executar atingir metas o Microsoft Excel varia o valor contido em uma célula que você especifica, até que uma fórmula dependente daquela célula produza o resultado desejado.

- ✓ Estimativa da evaporação potencial ( $E_p$ ) da radiação líquida para a temperatura de equilíbrio ( $R_{wp}$ ) e a evaporação do lago ( $E_w$ ), utilizando a temperatura de equilíbrio.

Para converter a evaporação potencial e a evaporação do lago de unidade de energia  $W/m^2$  em evaporação em milímetros foi necessário dividir pelo calor latente de vaporização ( $L$ ).

Dessa forma, são apresentadas na **Tabela 15 e 16** as informações obtidas com a aplicação deste método para as taxas de evaporação potencial e real nos açudes da bacia experimental do rio do Cedro.

**Tabela 15: Evaporação estimada pelo método de Morton para o ano de 2003**

Período	T	U	ea	es	Ge	Go	G	S	B	Rw	Ep	Ew
	°C	%	mbar	mbar	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>2</sup>	-	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	mm/dia	mm/dia
01/02/03 a 05/02/03	27,14	59,59	21,42	35,95	491,82	351,80	232,05	0,51	28,49	191,95	8,53	6,37
06/02/03 a 10/02/03	27,83	57,47	21,52	37,44	487,79	348,93	266,73	0,63	33,28	220,11	9,55	7,25
11/02/03 a 15/02/03	26,38	64,33	22,12	34,38	483,11	343,87	243,00	0,56	29,00	201,85	8,21	6,56
16/02/03 a 20/02/03	26,51	60,60	21,01	34,66	477,76	341,77	261,70	0,63	33,62	215,00	8,90	6,96
21/02/03 a 25/02/03	27,56	57,72	21,27	36,85	471,71	337,21	216,90	0,49	28,19	177,86	8,44	6,01
26/02/03 a 28/02/03	27,27	59,31	21,49	36,23	464,97	331,66	314,53	0,91	38,46	260,34	10,27	8,36
01/03/03 a 05/03/03	27,24	62,32	22,54	36,17	457,55	324,40	230,64	0,57	28,79	190,31	8,25	6,31
06/03/03 a 10/03/03	27,59	60,89	22,48	36,91	449,47	318,53	243,26	0,63	31,34	199,76	8,67	6,62
11/03/03 a 15/03/03	27,79	63,10	23,57	37,35	440,78	310,38	243,66	0,66	30,25	201,23	8,53	6,67
16/03/03 a 20/03/03	26,84	66,91	23,65	35,34	431,53	302,90	226,82	0,61	28,21	187,27	7,68	6,16
21/03/03 a 25/03/03	27,04	67,65	24,19	35,75	423,26	295,96	209,88	0,56	25,54	173,84	7,31	5,79
26/03/03 a 31/03/03	26,58	70,69	24,60	34,79	416,91	290,47	208,88	0,58	25,05	173,39	6,95	5,72
01/04/03 a 05/04/03	27,46	64,10	23,48	36,63	410,16	287,36	250,24	0,78	33,24	204,49	8,46	6,73
06/04/03 a 10/04/03	28,48	57,97	22,53	38,88	403,08	283,76	256,27	0,83	36,37	207,08	9,29	6,94
11/04/03 a 15/04/03	27,81	60,31	22,55	37,40	395,78	277,98	234,23	0,74	34,26	188,26	8,48	6,32
16/04/03 a 20/04/03	25,35	73,75	23,87	32,36	388,35	269,63	196,18	0,59	26,28	160,09	6,21	5,23
21/04/03 a 25/04/03	25,42	70,17	22,80	32,50	380,88	265,50	212,22	0,68	31,11	170,50	6,78	5,55
26/04/03 a 30/04/03	26,21	67,56	23,00	34,05	373,50	259,90	203,42	0,66	30,48	162,76	6,93	5,41
01/05/03 a 05/05/03	25,98	68,41	22,98	33,59	366,31	254,38	232,05	0,85	34,43	186,01	7,39	6,05
06/05/03 a 10/05/03	25,58	61,02	20,01	32,79	359,41	253,12	266,73	1,00	40,46	212,93	8,65	6,81
11/05/03 a 15/05/03	22,80	59,96	16,65	27,77	352,92	252,28	243,00	0,93	44,30	186,56	7,66	5,82
16/05/03 a 05/07/03												
06/07/03 a 10/07/03	20,85	76,31	18,82	24,66	328,87	230,02	187,30	0,70	36,16	141,78	5,06	4,38
11/07/03 a 15/07/03	21,30	86,18	21,84	25,34	331,81	228,10	138,63	0,45	23,06	108,63	3,59	3,46
16/07/03 a 20/07/03	20,13	88,83	20,95	23,58	335,53	232,58	111,40	0,33	12,02	93,81	2,97	2,99
21/07/03 a 25/07/03	21,32	82,58	20,95	25,37	339,99	235,63	189,34	0,68	32,47	147,40	4,77	4,54
26/07/03 a 31/07/03	21,19	81,78	20,58	25,17	345,10	240,04	189,87	0,67	32,59	147,78	4,83	4,55
01/08/03 a 05/08/03	20,89	83,16	20,55	24,71	350,80	244,48	184,50	0,62	31,20	144,07	4,61	4,42
06/08/03 a 10/08/03	21,94	77,33	20,38	26,35	356,99	249,74	210,86	0,74	35,05	165,27	5,65	5,10
11/08/03 a 15/08/03	21,77	79,95	20,85	26,08	363,57	254,05	173,84	0,53	28,29	136,86	4,76	4,29
16/08/03 a 20/08/03	22,90	77,25	21,59	27,94	370,45	258,65	155,54	0,44	23,80	123,96	4,78	4,03
21/08/03 a 05/10/03												
06/10/03 a 10/10/03	24,93	64,45	20,34	31,56	444,69	317,56	246,45	0,65	34,41	199,72	7,93	6,36
11/10/03 a 15/10/03	24,64	63,72	19,76	31,01	452,70	324,48	258,95	0,68	36,09	209,91	8,19	6,63
16/10/03 a 20/10/03	23,17	66,78	18,96	28,39	460,12	330,89	190,81	0,42	27,51	153,76	6,38	4,92
21/10/03 a 25/10/03	26,31	61,49	21,06	34,26	466,90	333,66	245,97	0,60	32,24	201,43	8,45	6,55
26/10/03 a 31/10/03	25,21	63,07	20,24	32,10	473,06	339,21	248,70	0,59	33,03	203,24	8,18	6,50
01/11/03 a 05/11/03	24,49	72,86	22,40	30,75	478,58	339,44	176,13	0,36	18,92	148,41	5,90	4,84
06/11/03 a 10/11/03	24,27	77,80	23,60	30,33	483,48	341,00	185,25	0,39	17,82	158,17	5,70	5,07
11/11/03 a 15/11/03	25,30	70,05	22,60	32,26	487,78	346,23	246,49	0,57	27,89	206,28	7,66	6,56

Período	T	U	ea	es	Ge	Go	G	S	B	Rw	Ep	Ew
	°C	%	mbar	mbar	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>2</sup>	-	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	mm/dia	mm/dia
16/11/03 a 20/11/03	25,94	66,62	22,32	33,51	491,52	349,69	258,24	0,60	29,81	215,52	8,27	6,90
21/11/03 a 25/11/03	25,12	68,75	21,95	31,92	494,73	352,32	226,51	0,49	25,90	189,28	7,33	6,07
26/11/03 a 30/11/03	26,23	62,45	21,28	34,08	497,44	355,88	233,69	0,50	28,23	193,77	8,16	6,32
01/12/03 a 05/12/03	27,14	59,59	21,42	35,95	499,69	357,63	233,06	0,50	28,12	193,29	8,57	6,40
06/12/03 a 10/12/03	27,83	57,47	21,52	37,44	501,51	359,07	269,30	0,61	32,68	223,15	9,63	7,34
11/12/03 a 15/12/03	26,38	64,33	22,12	34,38	502,93	358,47	250,51	0,55	28,65	209,33	8,39	6,77
16/12/03 a 20/12/03	26,51	60,60	21,01	34,66	503,97	361,19	264,03	0,59	32,18	218,64	8,99	7,07
21/12/03 a 25/12/03	27,56	57,72	21,27	36,85	504,65	361,64	263,69	0,59	32,12	218,39	9,44	7,18
26/12/03 a 31/12/03	27,27	59,31	21,49	36,23	504,97	361,37	247,35	0,53	29,58	205,40	8,91	6,77

Tabela 16: Evaporação estimada pelo método de Morton para o ano de 2004

Período	T	U	ea	es	Ge	Go	G	S	B	Rw	Ep	Ew
	°C	%	mbar	mbar	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>2</sup>	-	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	mm/dia	mm/dia
1/1/04 a 5/1/04	28.26	56.44	21.66	38.38	504.36	361.04	270.48	0.61	32.58	224.37	9.83	7.43
6/1/04 a 10/1/04	27.04	62.38	22.31	35.76	503.46	358.81	237.45	0.51	26.89	198.69	8.42	6.54
11/1/04 a 15/1/04	25.21	80.41	25.81	32.09	502.14	351.32	178.32	0.35	13.00	156.40	5.53	5.07
16/1/04 a 20/1/04	23.36	88.70	25.47	28.71	500.35	349.71	116.61	0.21	12.64	98.15	3.28	3.26
21/1/04 a 25/1/04	25.03	79.27	25.16	31.74	498.06	349.34	225.59	0.49	20.10	194.21	6.54	6.15
26/1/04 a 31/1/04	25.01	77.27	24.50	31.71	495.23	348.34	247.30	0.56	24.23	210.70	7.12	6.63
1/2/04 a 5/2/04	25.02	76.41	24.24	31.73	491.82	346.28	241.62	0.55	24.17	205.37	7.06	6.48
6/2/04 a 10/2/04	25.54	76.47	25.03	32.73	487.79	342.31	270.39	0.67	26.80	230.07	7.73	7.25
11/2/04 a 15/2/04	25.21	74.12	23.79	32.09	483.11	340.68	269.07	0.67	28.88	226.73	7.80	7.13
16/2/04 a 20/2/04	25.98	72.56	24.37	33.59	477.76	336.12	247.14	0.60	25.93	208.85	7.59	6.68
21/2/04 a 25/2/04	26.11	69.28	23.45	33.84	471.71	333.13	261.12	0.66	29.67	218.39	8.14	6.99
26/2/04 a 28/2/04	25.35	74.48	24.10	32.35	464.97	326.77	228.40	0.55	24.61	192.37	6.94	6.15
1/3/04 a 5/3/04	25.33	77.52	25.05	32.32	457.55	319.76	249.60	0.65	26.31	210.81	7.14	6.66
6/3/04 a 10/3/04	24.44	79.91	24.48	30.64	449.47	314.19	248.03	0.67	27.30	208.34	6.78	6.50
11/3/04 a 15/3/04	25.65	78.21	25.76	32.94	440.78	306.29	248.76	0.70	26.35	209.97	7.10	6.66
16/3/04 a 20/3/04	26.18	70.70	24.02	33.98	431.53	302.08	238.93	0.67	28.93	198.05	7.51	6.40
21/3/04 a 25/3/04	26.29	69.61	23.81	34.20	423.26	296.21	238.73	0.69	29.93	196.87	7.60	6.38
26/3/04 a 31/3/04	25.48	68.23	22.25	32.61	416.91	293.48	244.24	0.72	33.27	198.75	7.65	6.37
1/4/04 a 5/4/04	26.06	66.26	22.36	33.75	410.16	288.47	236.81	0.71	32.98	191.98	7.75	6.24
6/4/04 a 10/4/04	26.34	67.75	23.24	34.31	403.08	281.97	214.16	0.63	29.17	174.28	7.21	5.74
11/4/04 a 15/4/04	26.01	70.45	23.71	33.65	395.78	275.70	204.16	0.60	27.39	166.56	6.74	5.48
16/4/04 a 20/4/04	25.45	70.17	22.85	32.56	388.35	271.10	196.66	0.58	28.09	158.75	6.50	5.22
21/4/04 a 25/4/04	24.57	74.58	23.03	30.89	380.88	264.86	180.37	0.53	25.44	145.91	5.70	4.76
26/4/04 a 30/4/04	24.00	80.84	24.12	29.84	373.50	257.56	152.27	0.43	19.09	125.57	4.63	4.12
1/5/04 a 5/5/04	23.53	81.30	23.59	29.02	366.31	252.66	152.84	0.45	20.56	124.63	4.53	4.06
6/5/04 a 10/5/04	24.14	74.29	22.37	30.11	359.41	249.32	186.25	0.61	29.27	147.67	5.72	4.79
11/5/04 a 15/5/04	24.32	78.49	23.88	30.43	352.92	242.41	141.10	0.42	19.19	114.85	4.59	3.85
16/5/04 a 20/5/04	23.94	75.82	22.56	29.75	346.93	239.48	171.61	0.57	27.59	135.43	5.28	4.42
21/5/04 a 25/5/04	23.12	77.88	22.04	28.30	341.53	235.76	155.23	0.51	25.64	121.82	4.70	3.98
26/5/04 a 31/5/04	23.75	73.37	21.57	29.40	336.79	233.00	184.31	0.67	32.18	142.91	5.64	4.63
1/6/04 a 10/6/04												
11/6/04 a 15/6/04	22.39	81.45	22.06	27.09	327.27	224.60	164.94	0.59	28.52	128.17	4.50	4.09
16/6/04 a 20/6/04	21.90	80.29	21.10	26.28	325.80	224.60	151.55	0.52	27.51	116.46	4.27	3.75
21/6/04 a 25/6/04	20.64	80.13	19.50	24.33	325.22	226.30	157.56	0.55	30.59	119.09	4.23	3.74
26/6/04 a 30/6/04	21.35	84.10	21.38	25.42	325.55	223.89	136.31	0.45	23.94	105.56	3.68	3.40
1/7/04 a 5/7/04	21.38	84.00	21.40	25.47	326.78	224.83	133.85	0.44	23.31	103.84	3.65	3.35
6/7/04 a 10/7/04	23.11	76.87	21.74	28.29	328.87	226.58	166.41	0.59	29.40	128.69	4.95	4.17

Período	T °C	U %	ea mbar	es mbar	Ge W/m2	Go W/m3	G W/m2	S -	B W/m2	Rw W/m2	Ep mm/dia	Ew mm/dia
11/7/04 a 15/7/04	22.61	73.23	20.10	27.44	331.81	230.93	168.62	0.59	31.87	128.32	5.18	4.15
16/7/04 a 20/7/04	22.08	74.26	19.74	26.58	335.53	234.15	175.11	0.61	32.92	133.44	5.16	4.25
21/7/04 a 25/7/04	20.60	69.62	16.90	24.28	339.99	241.70	163.26	0.52	34.16	120.94	5.07	3.84
26/7/04 a 31/7/04	20.75	75.57	18.52	24.50	345.10	243.14	149.60	0.46	28.95	113.17	4.45	3.62
1/8/04 a 5/8/04	20.92	80.61	19.95	24.75	350.80	245.32	160.56	0.50	28.21	124.32	4.34	3.90
6/8/04 a 10/8/04	22.11	77.90	20.74	26.63	356.99	249.28	154.77	0.46	25.88	121.15	4.59	3.90
11/8/04 a 15/8/04	19.96	73.92	17.25	23.34	363.57	259.93	164.53	0.48	31.50	124.81	4.76	3.88
16/8/04 a 20/8/04	22.01	73.84	19.54	26.47	370.45	261.33	168.25	0.49	28.96	130.88	5.13	4.18
21/8/04 a 25/8/04	23.18	71.04	20.18	28.41	377.53	266.20	212.70	0.68	34.59	167.47	6.35	5.28
26/8/04 a 31/8/04	24.37	64.80	19.77	30.51	384.68	272.69	215.12	0.66	35.59	168.78	7.07	5.44
1/9/04 a 5/9/04	22.68	65.30	18.00	27.57	391.83	280.33	217.24	0.65	37.24	169.14	6.79	5.31
6/9/04 a 10/9/04	22.66	65.53	18.04	27.53	398.85	285.63	208.54	0.59	35.47	162.64	6.62	5.13
11/9/04 a 15/9/04	23.59	64.37	18.75	29.13	405.67	290.00	220.53	0.63	35.91	173.59	7.11	5.51
16/9/04 a 20/9/04	24.03	63.16	18.89	29.91	412.19	294.87	227.71	0.64	36.36	179.97	7.43	5.73
21/9/04 a 25/9/04	24.14	64.92	19.54	30.10	418.35	298.50	215.04	0.58	33.22	171.06	7.08	5.49
26/9/04 a 30/9/04	24.47	65.99	20.26	30.70	427.02	304.08	223.55	0.60	32.71	179.66	7.24	5.75
1/10/04 a 5/10/04	24.57	63.78	19.70	30.89	436.11	311.95	228.04	0.59	33.59	183.05	7.53	5.87
6/10/04 a 10/10/04	25.35	67.52	21.84	32.35	444.69	315.33	171.21	0.39	21.41	141.23	6.30	4.74
11/10/04 a 15/10/04	25.84	60.34	20.09	33.30	452.70	324.37	275.87	0.75	37.91	224.17	9.03	7.16
16/10/04 a 20/10/04	25.75	59.46	19.70	33.14	460.12	330.60	245.34	0.60	34.65	198.42	8.47	6.42
21/10/04 a 25/10/04	25.36	64.31	20.81	32.37	466.90	333.70	233.65	0.55	30.66	191.31	7.80	6.16
26/10/04 a 31/10/04	26.76	58.17	20.46	35.17	473.06	339.44	234.60	0.54	31.58	191.29	8.59	6.32

As Tabelas 17 e 18 apresentam um resumo mensal da evaporação potencial estimada pelo Método de Morton.

**Tabela 17: Evaporação Potencial mensal (mm) estimada pelo método de Morton para o ano de 2003**

Dias	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1 a 5	42,66	41,23	42,30	36,97	-	-	23,05	-	-	29,50	42,83
6 a 10	47,76	43,36	46,45	43,27	-	25,31	28,26	-	39,64	28,48	48,13
11 a 15	41,05	42,63	42,40	38,31	-	17,94	23,82	-	40,95	38,28	41,97
16 a 20	44,50	38,40	31,03	-	-	14,86	23,91	-	31,89	41,37	44,94
21 a 25	42,20	36,53	33,92	-	-	23,85	-	-	42,26	36,63	47,18
26 a *	30,82	41,72	34,65	-	-	28,96	-	-	49,07	40,81	53,47
<b>Total</b>	<b>248,98</b>	<b>243,88</b>	<b>230,76</b>	<b>118,56</b>	-	<b>110,93</b>	<b>99,04</b>	-	<b>203,81</b>	<b>215,08</b>	<b>278,53</b>

\* último dia do mês

**Tabela 18: Evaporação Potencial mensal (mm) estimada pelo método de Morton para o ano de 2004**

Dias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
1 a 5	49,17	35,29	35,69	38,73	22,63	-	18,24	21,71	33,97	37,65
6 a 10	42,09	38,67	33,88	36,07	28,61	-	24,73	22,94	33,10	31,50
11 a 15	27,65	39,02	35,49	33,68	22,97	22,50	25,91	23,80	35,54	45,17
16 a 20	16,39	37,97	37,57	32,50	26,39	21,35	25,80	25,63	37,15	42,37
21 a 25	32,72	40,68	37,98	28,51	23,50	21,16	25,36	31,76	35,41	39,00
26 a *	42,71	27,76	45,92	23,14	33,84	18,39	26,72	42,42	43,45	51,55
<b>Total</b>	<b>210,73</b>	<b>219,39</b>	<b>226,53</b>	<b>192,63</b>	<b>157,94</b>	<b>83,40</b>	<b>146,76</b>	<b>168,26</b>	<b>218,62</b>	<b>247,24</b>

\* último dia do mês



➤ **Balanço Hídrico**

Para a aplicação do método do Balanço Hídrico foram utilizados os dados do reservatório de Nenenzinho uma vez que foi o único possível de realizar o acompanhamento da variação do nível d'água do reservatório por observador local. Outro fator que limitou a aplicação desse método foram as chuvas intensas ocorridas no período de janeiro de 2004, que impossibilitou a medição das vazões afluentes por danificar os equipamentos de medição. Para esse cálculo foi considerado o período restante, com vazões afluentes ao reservatório nulas.

No que se refere à infiltração, foi considerado que, devido a área estar sob embasamento cristalino e não haver vegetação verdejante a jusante do barramento, o que indicaria alimentações subterrâneas, esse valor é desprezado nos cálculos do balanço hídrico do reservatório.

Como não houve no período estudado retirada de água significativa referente ao atendimento a demanda, apenas dessedentação animal esporádica, esta variável foi considerada desprezível. Conforme MOLLE (1989) considerando-se um volume diário de 40 litros/res, um espelho de água de 1 ha de superfície e submetido a uma evaporação de 8 mm/dia, evapora o equivalente do volume consumido por 2.000 reses, tornando-se desprezível o volume de abastecimento da grande maioria dos pequenos reservatórios.

Assim a evaporação foi calculada em função apenas da precipitação do posto mais próximo ao reservatório, considerada como a entrada de água no sistema, e da variação mensal do nível d'água que representa a variação mensal do volume armazenado no reservatório.

A equação do balanço hídrico (**Equação 65**)

$$V_{evap} = \Delta V - V_p + V_{escoa} - V_{inf} - V_{uso} - V_{extrav}$$

fica reduzida a

$$V_{evap} = \Delta V - V_p \quad (69)$$

Como essas variáveis referem-se a valores proporcionais à superfície alagada pode-se reescrever esse balanço hídrico como:

$$E = \Delta H - P \quad (70)$$

onde  $\Delta H$  é o rebaixamento observado no nível do reservatório,  $P$  é a precipitação e  $E$  é a evaporação.

Os valores das variáveis hidrológicas do balanço hídrico foram definidas em milímetros, sendo a análise iniciada em julho de 2003 que configurou o período de treinamento do observador local não sendo computado no cálculo da evaporação. Em dezembro de 2003 o reservatório atingiu níveis mínimos, não podendo mais ser realizada a leitura das régua linimétricas do açude, conforme apresentado na **Figura 21**, ficando esse mês sem estimativa da evaporação por esse método.



**Figura 21: Açude de Nenezinho**

Em janeiro de 2004 as chuvas intensas provocaram o transbordamento do reservatório, mantendo seu nível máximo até meados de fevereiro de 2004, conforme apresentado na

**Figura 22 e 23**, fazendo com que não fosse possível a estimativa da taxa de evaporação nesses dois meses.



**Figura 22: Açude de Nenezinho extravasando – janeiro 2004**



**Figura 23: Nível do açude de Nenezinho – janeiro 2004**

Nos meses de maio e agosto de 2004 não houve registro de chuva na área de estudo, mas houve aumento de nível do reservatório representado pela leitura feita pelo observador local.

Com a análise da série de dados foram considerados valores duvidosos dessas variáveis não sendo esses meses adequados para estimativa da evaporação.

Diante dessas ressalvas na aquisição dos dados referentes a aplicação do balanço hídrico no reservatório de Nenenzinho, a estimativa da evaporação apresentada na **Tabela 19** fica restrita à influência apenas da precipitação e variação do nível do reservatório além de apresentar um período com falhas significativas. A consequência direta destas restrições é que a maior parte dos dados selecionados referem-se ao período seco.

Esse intervalo de estudo mensal foi definido com base na revisão bibliográfica que afirma que períodos menores de que mensal embute nos valores encontrados erros significativos na definição da taxa de evaporação.

**Tabela 19: Evaporação mensal estimada pelo método do Balanço Hídrico**

Mês	Precipitação (mm)	Varição no volume (mm)	Evaporação (mm)
jul/03	82.29	100	
ago/03	45.21	-120	165.21
set/03	40.13	-160	200.13
out/03	1.52	-200	201.52
nov/03	71.37	-80	151.37
dez/03	16.00		
jan/04	451.36		
fev/04	144.78		
mar/04	9.65	-130	139.65
abr/04	50.55	-200	250.55
mai/04			
jun/04	59.18	-60	119.18
jul/04	14.48	-200	214.48
ago/04			
set/04	-	-260	260.00
out/04	8.89	-230	238.89

➤ **Dados de evaporação observados no Tanque Classe A modificado**

Os dados apresentados nas **Tabelas 20 e 21** representam a leitura realizada por observador local no Tanque Classe A modificado, instalado na bacia experimental. Os valores apresentados em vermelho representam os dados observados em dia de chuva, configurando

dados duvidosos, uma vez que, devido ao aumento do nível do tanque e possível transbordamento, o valor lido na escala graduada não sofre variação durante o evento de chuva e pelo período que o sistema atinja o equilíbrio de nível. Esse equilíbrio é atingido quando o nível d'água do tanque principal volta a estar a 6 cm da borda e a água transborda pelo suspiro presente no tanque intermediário.

**Tabela 20: Dados observados do Tanque Classe A – ano 2003**

Dia	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1		7,4	7,2	0	0	5,4	6,7	4,6	14,6	4,9
2		8,2	7	0	0	2	4,8	6,4	11,6	8,9
3		8,8	5,2	0	6,4	1,8	3,4	8	4,4	8,9
4		6,2	0,2	0	5,4	0	0,2	9,4	0	6,7
5		11,6	0	0	3,2	6	0	3,6	0	7,3
6		7,8	0,2	0,6	3,4	4,6	0	4,4	0	9,1
7		9	0,6	3,6	5,2	4,4	0	9,8	0	8,2
8		7,6	6	0,4	2,2	0,6	0	9,4	0	3,9
9		11,4	4,4	6,2	5	0,4	0	3,2	0	12
10		3,2	0	0,2	0	4,2	0	10,2	0,4	12,7
11			0	0	0	4	0	6,4	1,8	10
12		10	0	0,1	0	2,8	0,4	9	5,8	11,3
13		8,1	0	0,7	0,6	5,6	5,6	8,8	6,4	8,6
14		4,6	0,2	4	0,2	0,4	4,8	8,8	10,2	2,2
15		7,2	0	2,8	0	6	4	5,4	9,6	0
16		0,6	0,2	5	0	3	8,2	0,8	4,4	5,7
17		7,6	3,8	4,8	0	3	2	4,4	5,6	8,1
18		4,8	2	2,2	0	5,2	7,6	7,6	8,2	8,2
19		7,4	2	0,8	0	0	7,4	10	10,8	5,7
20		4,8	3	0	0	0	7,4	2,8	9,6	7,9
21		10	3,8	0,2	1	0	2	9,2	8,2	10,4
22		8,4	3,4	4,4	7	0	11,9	10,2	3	10,7
23			6,2	0,6	0,4	0		3,6	12,6	10
24		0,2	1,8	0,6	1,6	0	4,2	4,8	6,2	7,1
25		8	5	0	2,2	0	10,6	7,8	7,2	10,8
26		6,6	0,2	0	9,4	0,2	6,4	10,2	7,6	8,1
27	5,4	7,4	0	0	4,2	5	6,8	2,8	9,4	10,2
28	3,2	5,2	0	0	0	5,2	5,2	7,6	9,2	10,7
29	4,8	5,6	0	0	0	2,2	9	7,6	10,2	6,1
30	6,6	8,4	0	0	3,2	5,6	7,6	9,6	7,9	10
31	8,6		0		3,4	5,8		2,6		
<b>Total</b>	<b>Falha</b>	<b>196,10</b>	<b>62,40</b>	<b>37,20</b>	<b>64,00</b>	<b>83,40</b>	<b>126,20</b>	<b>209,00</b>	<b>184,90</b>	<b>244,40</b>

Obs: Dados em vermelho representam os dados coletados em dia com eventos de chuva

**Tabela 21: Dados observados do Tanque Classe A – ano 2004**

Dia	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
1		0.00	5.10	0.00	3.20	0.60	1.60	4.70	6.20
2	5.20	0.00	6.90	0.00	1.80	0.00	0.90	5.30	4.90
3	4.30	3.10	5.20	2.70	3.20	0.10	4.20	5.00	7.10
4	6.90	4.10	5.20	0.00	6.10	1.20	6.00	13.90	6.00
5	1.80	5.90	2.90	3.10	4.90	7.70	0.00	5.10	9.20
6	6.90	2.00	9.20	4.20	5.20	3.30	0.00	6.20	4.00
7	5.30	2.90	6.70	6.90	3.90	1.10	11.10	9.10	5.70
8	1.20	0.00	falha	3.30	0.00	2.00	4.10	8.50	4.30
9	0.00	2.20	6.00	2.80	0.00	0.00	10.80	5.10	0.10
10	3.80	5.20	0.80	2.20	0.10	2.20	0.10	2.60	0.10
11	2.00	7.10	4.90	11.00	0.00	9.90	1.10	9.10	8.20
12	6.10	5.90	6.10	1.80	0.00	5.70	3.80	8.60	11.80
13	7.00	5.10	6.90	0.00	2.10	5.30	9.20	8.30	9.90
14	5.10	3.80	3.20	2.80	3.20	0.00	2.80	3.00	11.20
15	4.70	5.10	5.80	5.00	0.70	3.70	3.10	11.90	10.00
16	6.30	6.90	5.30	4.90	3.10	1.10	6.00	9.20	7.80
17	4.60	4.90	5.60	3.10	1.90	0.80	2.30	6.70	6.00
18	7.30	7.20	4.30	3.10	2.90	6.00	7.00	6.20	11.00
19	6.10	2.00	5.00	4.10	0.20	4.10	6.70	7.10	8.10
20	2.80	8.00	4.20	3.70	3.90	4.00	3.10	6.80	6.20
21	9.00	7.00	6.90	1.10	3.90	3.30	2.90	9.90	7.30
22	7.30	4.90	7.90	0.30	1.30	6.80	5.30	3.30	5.60
23	7.00	5.10	1.90	3.80	3.70	6.80	3.60	11.90	3.00
24	10.70	3.90	0.00	4.10	0.20	2.20	8.20	8.10	4.10
25	5.00	8.10	0.30	5.90	2.20	3.80	8.80	6.80	12.00
26	6.00	5.10	3.20	7.00	1.00	5.20	9.90	7.20	6.30
27	7.00	8.90	3.00	7.40	4.00	7.00	2.10	6.00	12.70
28	2.20	6.10	3.80	4.80	2.80	0.10	6.00	8.00	7.00
29	0.00	4.20	0.30	4.00	2.20	1.60	8.00	8.30	9.10
30		6.90	0.00	1.20	2.00	3.00	7.30	8.90	8.90
31		5.00		3.70		4.40	4.00		
<b>Total</b>	<b>141.6</b>	<b>146.6</b>	<b>126.6</b>	<b>108</b>	<b>69.7</b>	<b>103</b>	<b>150</b>	<b>220,8</b>	<b>213,8</b>

Obs: Dados em vermelho representam os dados coletados em dia com eventos de chuva

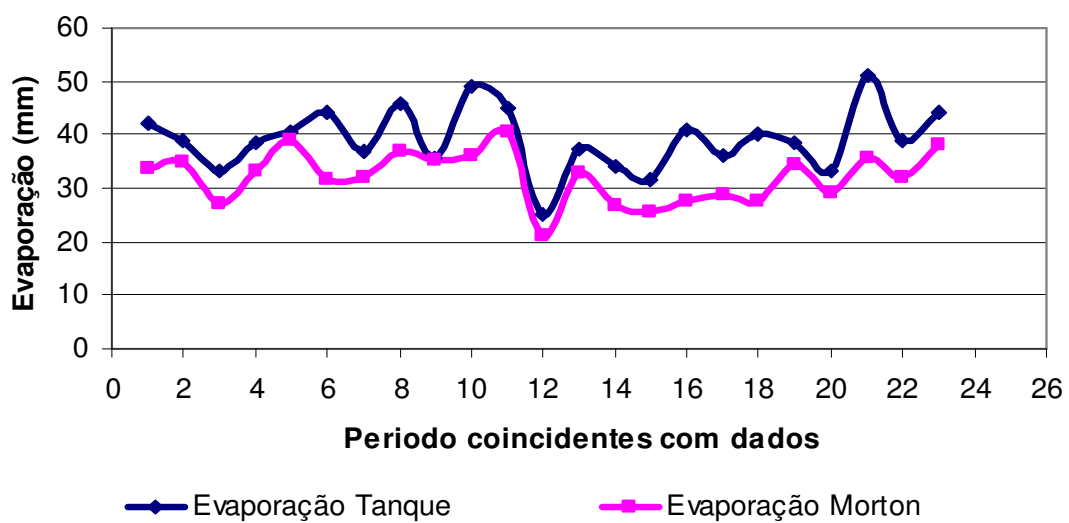
Para cálculo do coeficiente que define a relação entre a evaporação medida no Tanque Classe A e a evaporação de um lago ( $K_c$ ), foram utilizados os dados de evaporação calculados com o método de Morton para o período coincidente ao período de observação no tanque. Essa escolha foi devido ao método de Morton fornecer valores de evaporação do lago além da evaporação potencial e ter número de dados maior que os obtidos com a aplicação do balanço hídrico. Para essa comparação foi determinado o total dos valores das Tabelas 20 e 21 a cada

5 dias conforme foi calculada a evaporação pelo método de Morton. Entretanto, a série de dados de evaporação de tanque contém muitos dados duvidosos para os dias chuvosos, dessa forma o coeficiente calculado refere-se apenas para os dias secos do ano de 2003 e 2004 e está apresentado na **Tabela 22**.

**Tabela 22: Comparação da evaporação medida em tanque e calculada pelo método de Morton**

Período			Nº do Período	Evaporação (tanque)	Evaporação (Morton)	Coeficiente (Kc)
1/4/03	a	5/4/03	1	42.2	33.66	0.80
6/4/03	a	10/4/03	2	39	34.68	0.89
26/4/03	a	30/4/03	3	33.2	27.04	0.81
11/10/03	a	15/10/03	4	38.4	33.14	0.86
26/10/03	a	31/10/03	5	40.4	38.97	0.96
26/11/03	a	30/11/03	6	44.3	31.61	0.71
1/12/03	a	5/12/03	7	36.7	32.02	0.87
6/12/03	a	10/12/03	8	45.9	36.71	0.80
16/12/03	a	20/12/03	9	35.6	35.35	0.99
21/12/03	a	25/12/03	10	49	35.88	0.73
26/12/03	a	31/12/03	11	45.1	40.60	0.90
16/8/04	a	20/8/04	12	25.1	20.91	0.83
26/8/04	a	31/8/04	13	37.3	32.66	0.88
1/9/04	a	5/9/04	14	34	26.56	0.78
6/9/04	a	10/9/04	15	31.5	25.66	0.81
11/9/04	a	15/9/04	16	40.9	27.57	0.67
16/9/04	a	20/9/04	17	36	28.67	0.80
21/9/04	a	25/9/04	18	40	27.44	0.69
26/9/04	a	30/9/04	19	38.4	34.51	0.90
1/10/04	a	5/10/04	20	33.4	29.33	0.88
11/10/04	a	15/10/04	21	51.1	35.81	0.70
16/10/04	a	20/10/04	22	39.1	32.12	0.82
26/10/04	a	30/10/04	23	44	37.92	0.86
<b>Coeficiente Médio</b>						<b>0.82</b>

O **Gráfico 5** apresenta a comparação dos valores de evaporação medida em tanque e calculada pelo método de Morton para o período de dados coincidentes ocorridos em dias não chuvosos.



**Gráfico 5: Comparação dos valores de evaporação medida em tanque e calculada pelo modelo de Morton para o período de dados coincidentes.**



## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO

Diante da revisão bibliográfica realizada referente aos métodos de estimativas de evaporação e dos dados disponíveis na bacia experimental do rio do Cedro, foi considerado, para o presente trabalho, o método proposto por Morton (1983a) para o conjunto de dados disponíveis nos primeiros anos de implantação da bacia experimental como o mais consistente conceitualmente na estimativa da evaporação nos açudes, uma vez que não houve utilização de parâmetros tabelados para representar a área de estudo, fato que ocorreu para aplicação dos demais métodos de estimativa da evaporação potencial, prejudicando a aplicação destes e avaliação da adequação de uso para a área de estudo.

O método de Morton calcula a evaporação do lago, e não somente a evaporação potencial como os demais; sua formulação leva em consideração a diferença entre o ambiente do lago e o ambiente terrestre utilizando o conceito de temperatura de equilíbrio o que não acontece com os outros métodos, levando-os a cometer uma simplificação ao considerar a temperatura do ar igual a temperatura medida em terra para o ambiente do lago; o detalhamento da sua formulação faz com que o balanço de energia seja elaborado a partir da localização da área referida (latitude e altitude da estação de medição) e não a partir de valores tabelados para localidades próximas que já tenham os dados de radiação.

As limitações inerentes aos primeiros anos de operação da bacia experimental não permitem a seleção do melhor método de estimativa de evaporação para a área de estudo necessitando da continuidade da avaliação para suprir as informações exigidas para aplicação dos diversos métodos apresentados possibilitando uma avaliação mais definitiva.

Os valores obtidos para a evaporação mensal a partir dos métodos do Balanço de Energia, de Penman e de Priestley e Taylor estão apresentados nas **Tabelas 23 e 24** para comparação dos

resultados de evaporação potencial. Os valores em vermelho representam os meses com falhas de medição de dados.

**Tabela 23: Comparação entre os métodos utilizados para estimativa da evaporação (mm) na bacia experimental do rio do Cedro – ano 2003**

Método	Balanco de Energia (Ep)	Penman (Ep)	Priestley e Taylor (Ep)	Morton (Ep)	Morton (E)
JAN					
FEV	135.82	171.14	173.51	248.98	190.86
MAR	136.30	171.74	173.33	243.88	192.14
ABR	123.59	155.73	156.37	230.76	180.84
MAI*	61.98	78.10	77.32	118.56	93.39
JUN					
JUL**	76.37	96.23	88.39	110.93	104.18
AGO***	69.14	87.11	80.30	99.04	89.20
SET					
OUT****	118.11	148.82	153.29	203.81	161.32
NOV	121.22	152.74	150.36	215.08	178.79
DEZ	142.03	178.96	184.87	278.53	214.42
<b>Anual</b>	<b>984.57</b>	<b>1,240.56</b>	<b>1,237.74</b>	<b>1,749.56</b>	<b>1,405.16</b>
<b>% Morton (Ep)</b>	<b>56.28</b>	<b>70.91</b>	<b>70.75</b>	<b>100.00</b>	<b>80.31</b>

\*16 dias de observação

\*\*28 dias de observação

\*\*\*22 dias de observação

\*\*\*\*27 dias de observação

**Tabela 24: Comparação entre os métodos utilizados para estimativa da evaporação (mm) na bacia experimental do rio do Cedro – ano 2004**

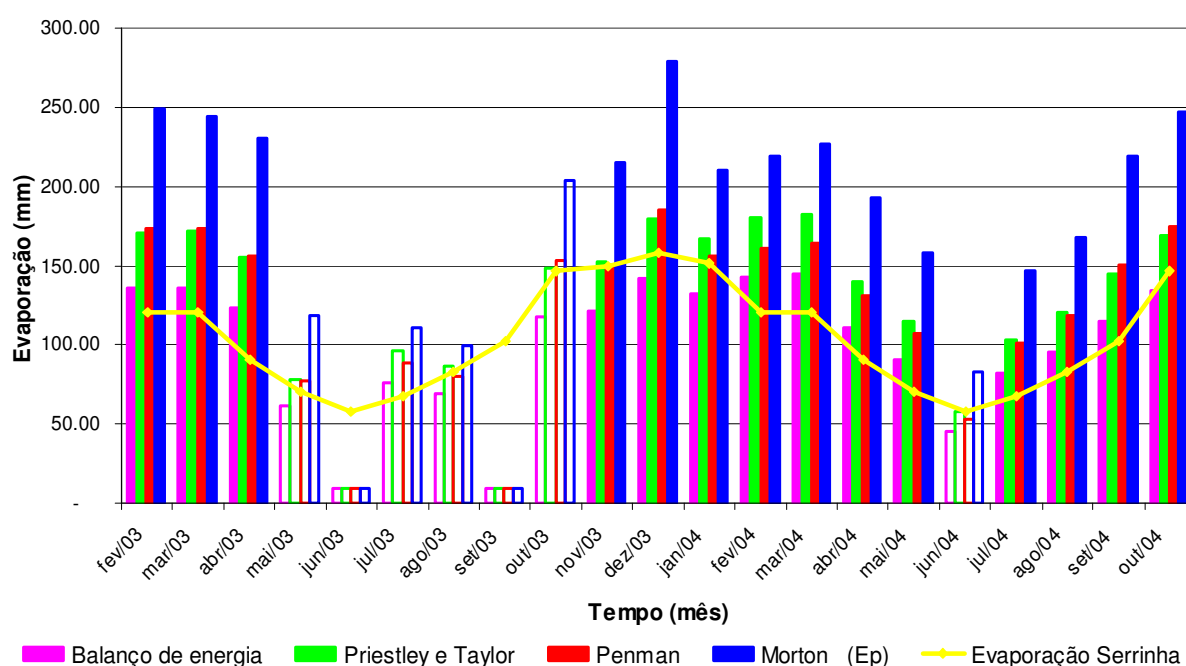
Método	Balanco de Energia	Penman	Priestley e Taylor	Morton (Ep)	Morton (Ew)
JAN	132.08	166.42	156.71	210.73	181.98
FEV	142.98	180.15	161.21	219.38	197.25
MAR	144.39	181.93	163.54	226.54	201.25
ABR	110.72	139.51	131.50	192.63	157.81
MAI	90.75	114.34	106.75	157.94	133.29
JUN*	45.65	57.52	53.28	83.41	74.87
JUL	81.95	103.26	101.16	146.76	120.62
AGO	95.73	120.62	118.55	168.26	138.40
SET	114.66	144.47	150.38	218.62	170.42
OUT	133.67	168.42	174.45	247.24	189.68
<b>Anual</b>	<b>1,092.58</b>	<b>1,376.65</b>	<b>1,317.53</b>	<b>1,871.51</b>	<b>1,565.56</b>
<b>% Morton (Ep)</b>	<b>58.38</b>	<b>73.56</b>	<b>70.40</b>	<b>100.00</b>	<b>83.65</b>

\*18 dias de observação

Para avaliação da consistência desses valores tomou-se como base a evaporação de Serrinha, município mais próximo da bacia experimental com dados referente às normais climatológicas do período de 1961 a 1990 divulgado. Os valores da evaporação de Serrinha refere-se a dados de Tanque Classe A e apresentam os valores mensais constantes na **Figura**

28. Cabe observar que a climatologia de Serrinha se apresenta com características mais úmidas por estar mais próxima ao litoral e São Domingos tem um clima mais árido tanto pela tipologia climática quanto pela observação durante o período de estudo, quando foi constatado que a pluviometria de Serrinha é maior que a de São Domingos. Dessa forma os valores de evaporação potencial encontrados para São Domingos tem o indicativo de ser superiores aos valores característicos de Serrinha.

No **Gráfico 6** estão apresentados os valores da evaporação potencial mensal calculada, sendo que as barras sem preenchimento representam valores mensais com falhas nos dados diários medidos.



**Gráfico 6: Evaporação potencial mensal (mm) calculada pelos métodos de Balanço de Energia, Priestley e Taylor, Penman e Morton.**

A partir da análise das **Tabelas 23 e 24** e do **Gráfico 6** pode-se identificar que os valores obtidos com o método de Morton em comparação com os outros métodos aplicados, superestimam as taxas de evaporação. Os valores obtidos pelo método de Penman

representam em torno de 70 % dos valores encontrados com a relação complementar para evaporação potencial.

Um fator que explica o fato dos resultados da aplicação de Morton fornecer valores superiores da evaporação é a radiação solar na parte externa da atmosfera utilizada nos cálculos. Para o método de Morton essa variável foi calculada de acordo com as formulações fornecidas e geraram valores em média 7% maiores que os valores tabelados utilizados na aplicação dos demais métodos, chegando a 25% no mês de dezembro, quando foi encontrado valor elevado de evaporação. No período de junho a setembro os valores tabelados e calculados praticamente se igualam, entretanto os valores calculados para a evaporação nesse período mantém a diferença observada nos demais meses, embora seja menor. A comparação entre a radiação utilizada na aplicação do método de Morton ( $G_{\text{calculada}}$ ) e a radiação utilizada nos demais métodos ( $G_{\text{tabelada}}$ ) está apresentada na **Tabela 25**.

**Tabela 25: Comparação entre os valores de radiação solar na parte externa da atmosfera utilizados**

Latitude	$G_{\text{Tabelada}}$	$G_{\text{Calculada}}$	$G_{\text{tabelada}}/G_{\text{calculada}}$
jan	938	1.031	1,10
fev	920	988	1,07
mar	867	899	1,04
abr	791	807	1,02
mai	696	722	1,04
jun	661	675	1,02
jul	684	689	1,01
ago	755	757	1,00
set	838	843	1,01
out	897	939	1,05
nov	826	1.007	1,22
dez	832	1.036	1,25
<b>Média</b>	<b>809</b>	<b>866</b>	<b>1,07</b>

Os valores de Priestley e Taylor apresentaram significativa aproximação aos valores de Penman, justificada por serem métodos que abrangem a mesma base teórica. Entretanto percebe-se que a evaporação estimada pelo método de Priestley e Taylor se apresenta

ligeiramente superior a de Penman no período mais úmido (meados de 2003 e janeiro a agosto de 2004) e inferior no período mais seco (fevereiro a abril de 2003, outubro a dezembro de 2003 e setembro e outubro de 2004). A evaporação mensal estimada por estes dois métodos segue a tendência da evaporação em Serrinha com valores em média 38 mm superiores, com exceção do mês de novembro de 2003 que não apresenta diferença significativa. Como a evaporação calculada por estes métodos refere-se à evaporação potencial enquanto a de Serrinha é evaporação medida em Tanque Classe A, essa diferença indica valores calculados abaixo do esperado para a região.

Já o Balanço de Energia apresentou valores baixos para a média encontrada para o semi-árido na literatura pesquisada, assim como quando comparada com a evaporação média do município de Serrinha, apresentando valores menores em períodos secos na bacia experimental como ocorre em novembro e dezembro de 2003, período de altas taxas de evaporação. Essa análise indica que os valores obtidos por este método subestima a evaporação em cenários semelhantes a BHEC. Isso pode ser devido ao fato que foram desprezados parcelas integrantes desse balanço que não tiveram medição possível para a presente pesquisa.

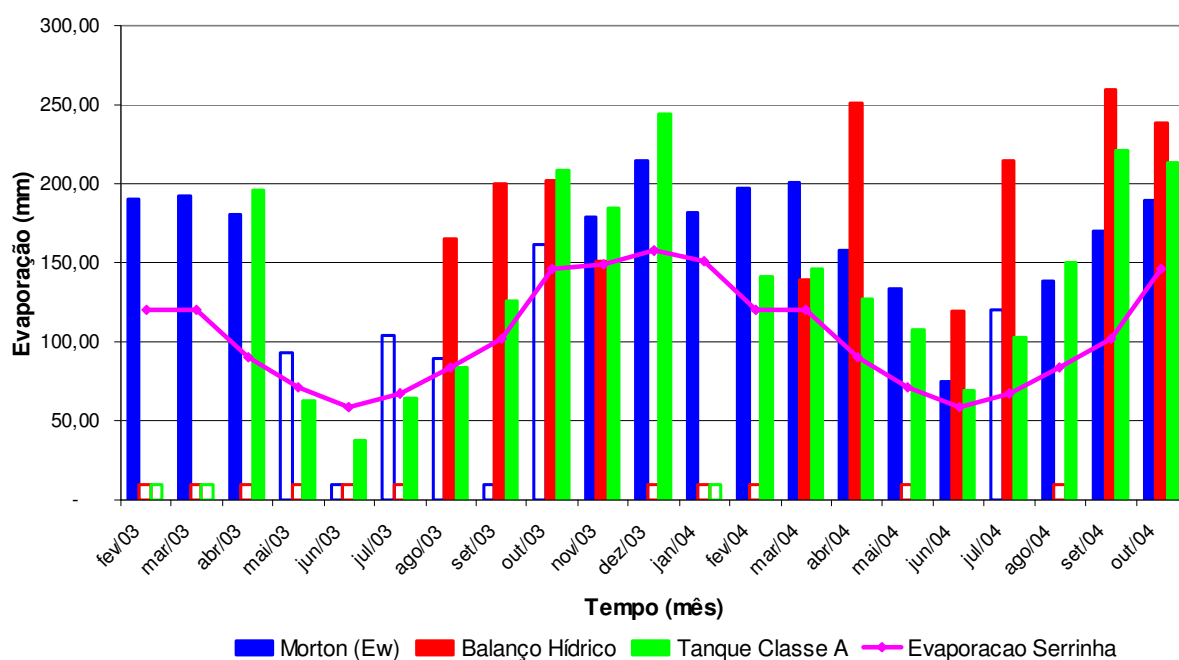
A razão de Bowen, determinada em função direta da temperatura e umidade do ar, apresentou valores em torno de 3 compatível com as taxas encontradas por Novaes e Bignell (1993) para o Reservatório de Sobradinho, considerada razoável por este lago estar localizado no Polígono da Seca no Nordeste Brasileiro. Esses valores estão compatíveis também com a análise que, sendo em regiões áridas o calor sensível responsável por maior parte da energia disponível, os valores da razão de Bowen devem exceder o valor 1.

Seguindo a mesma análise dos métodos anteriores tem-se que os valores de evaporação potencial definidos pela aplicação do método proposto por Morton segue o mesmo comportamento mensal do apresentado em Serrinha com valores máximos em novembro,

dezembro e janeiro e mínimo em junho, entretanto com valores superiores em média de 100 mm da evaporação de Serrinha.

Para análise dos valores obtidos da evaporação real foram comparados os métodos do Balanço Hídrico, Morton e valores medidos em Tanque Classe A, conforme apresentado no **Gráfico 7**. As falhas nos resultados dificultam uma comparação mais detalhada que gere informações consistentes. Apenas nos meses de setembro e outubro de 2004 houve uma convergência no controle da aquisição dos dados, possibilitando as seguintes considerações:

1. A estimativa da evaporação do lago foi representada satisfatoriamente pelo método de Morton, quando comparados os valores encontrados para os outros métodos uma vez que forneceu resultados nos limites esperados – menores que os do Tanque Classe A e com a mesma tendência de comportamento.
2. O Balanço Hídrico forneceu resultados mais elevados, podendo ser justificado por abranger todas as perdas de água do sistema, uma vez que não foram consideradas a infiltração e eventuais retiradas para atendimento a demandas.



**Gráfico 7: Evaporação real mensal (mm) calculada pelos métodos de Morton, Balanço Hídrico e medida e Tanque Classe A.**

No que se refere a estimativa da evaporação de reservatórios a partir de dados do Tanque Classe A, deve-se observar a qualidade da série obtida, a qual apresentou um número significativo de valores duvidosos devido a:

- ✓ funcionamento do equipamento, que nos dias chuvosos tem sua leitura prejudicada, uma vez que o equilíbrio do sistema é afetado pela entrada de água no tanque principal fazendo com que essa água passe ao tanque intermediário para extravasar pelo suspiro, até que o sistema entre de novo em equilíbrio no nível d'água entre os tanques. Dessa forma os valores observados em dia de chuva e nos dias subsequentes foram zero ou próximos a zero.
- ✓ limpeza do equipamento realizada pelo observador local, que apresentou deficiência, uma vez que, nas vistorias realizadas periodicamente, foram verificadas a presença de animais no tanque intermediário conforme ilustrado na **Figura 24**.
- ✓ leituras do observador, que não pôde ser acompanhado para verificação da qualidade das leituras realizadas diariamente.



**Figura 24: Tanque intermediário do conjunto evaporímetro**

Diante desse contexto foram consideradas consistentes apenas as leituras realizadas no período seco, a partir do qual foi determinado o coeficiente que relaciona as leituras do Tanque Classe A com os valores estimados pelo método de Morton para evaporação de lago ( $K_c$ ). O valor encontrado para  $K_c$  - **0,82** - deve ser considerado como preliminar, embutida a necessidade de avaliações futuras com a aquisição de dados mais consistentes.

Reportando-se a valores encontrados na literatura, tem-se indicações de coeficientes de passagens variando entre 0,6 e 0,9 com valor médio de 0,75. Molle (1989) em estudo realizado em bacias experimentais no semi-árido obteve um valor de 0,85. O valor encontrado pela presente pesquisa está então dentro dos limites esperados para a região.

A partir das análises apresentadas, considera-se para a presente pesquisa que o método de Morton forneceu os valores de evaporação em reservatórios para a BHEC conceitualmente mais controlados, sem incorrer em valores tabelados para representar a área de estudo, sendo, portanto, selecionado para representar preliminarmente o comportamento deste fenômeno na área de estudo.

Entretanto cabe a ressalva que os demais métodos tiveram simplificação na sua aplicação por falta de dados medidos na região, devendo ser investigado com maior precisão os parâmetros utilizados nesses métodos para representar a evaporação local para embasar uma avaliação mais coerente da aplicação desses métodos. Nesse contexto entra a importância da bacia experimental como unidade de pesquisa para atender as essas restrições presentes em estudos de complexidade acentuada como o da evaporação.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA EVAPORAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL

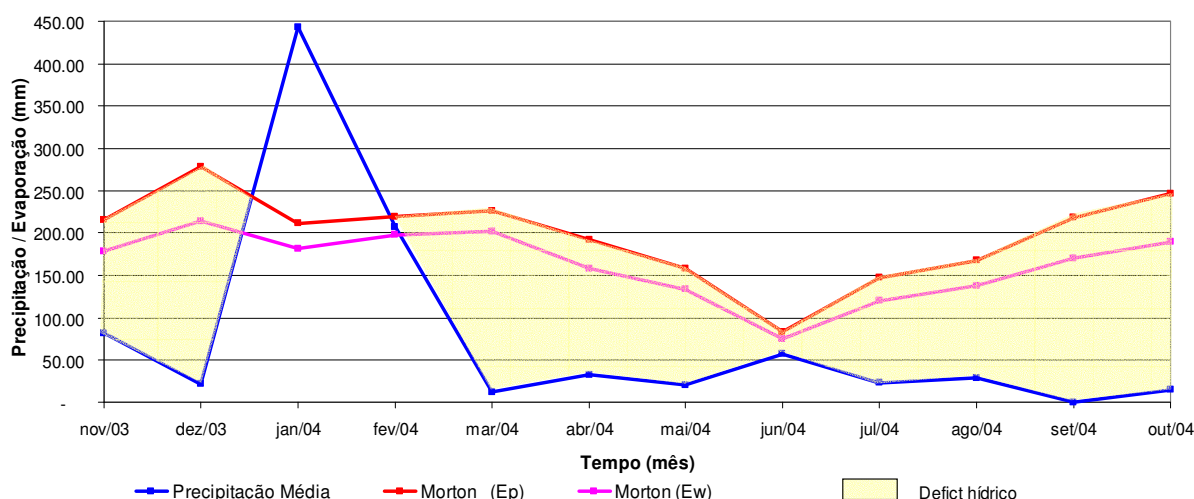
Considerando os valores obtidos pela aplicação de Morton foi realizada a caracterização da evaporação em reservatórios da BHEC.



A variação da taxa de evaporação diária no período de estudo, para os meses coincidentes de dados, apresentou uma tendência similar no comportamento da evaporação com valores diários variando de 6,01 a 8,36 para fevereiro de 2003 e 6,15 mm a 7,25 mm para fevereiro de 2004. O mês de março apresentou taxas de evaporação variando de 5,72 mm a 6,67 mm para 2003 e 6,37 mm a 6,66 mm para 2004.

Para a região, os meses de janeiro e dezembro apresentaram maiores taxas de evaporação. No ano de 2004 a evaporação teve seu mínimo diário em meados de janeiro, coerente com a observação local uma vez que esse período registrou maior valor de umidade relativa (88%). Nesse período houve uma elevada pluviosidade chegando a 204 mm no intervalo de 5 dias.

A contabilização da água que circula entre o reservatório e a atmosfera é dada pela diferença entre a precipitação e a evaporação real e a demanda evaporativa da atmosfera é dada pela evaporação potencial. A relação entre essas três variáveis mostra a deficiência hídrica presente na bacia experimental referente às águas armazenadas. Esse balanço hídrico abrangendo o período de novembro de 2003 a outubro de 2004 está apresentado no **Gráfico 8**.



**Gráfico 8: Balanço hídrico – novembro de 2003 a outubro de 2004**

O mês de dezembro de 2003 apresentou o maior déficit hídrico, sendo a diferença entre a precipitação e a evaporação potencial igual a 256,56 mm.

A evaporação potencial calculada no período de novembro de 2003 a outubro de 2004 na BHEC foi de 2.365,12 mm, enquanto que foi calculado um valor de 1.958,77 para a taxa de evaporação real. A deficiência hídrica da bacia em relação à evaporação em açudes, caracterizada pela diferença entre a evaporação potencial e a real, foi de 406 mm para o período de análise. A evaporação nos reservatórios representou em média 83% da evaporação potencial.

Somando as diferenças entre a precipitação e a evaporação do lago no período de novembro de 2003 a outubro de 2004, constata-se que houve uma perda de água para a atmosfera de 1.013,77 mm, essa taxa aplicada a um valor médio das áreas alagadas pelos reservatórios existentes na bacia experimental mostra que em um ano essa bacia perdeu 639.041 m<sup>3</sup> de água para a atmosfera.

Observando ainda o período de novembro de 2003 a outubro de 2004, pode-se observar que a evaporação gerou uma perda de 56% do volume máximo armazenado nesses reservatórios, considerando uma áreas alagadas média para cálculo do volume evaporado. Esse valor de 1.233.968,58 m<sup>3</sup> representa 7% do volume precipitado em toda a bacia durante esse ano que foi caracterizado por chuvas acima da média para a região (945 mm). Como a série de dados do ano de 2003 contém falhas significativas, essa análise não pode ser realizada para um período seco.

Percebe-se, ainda, a importância do entendimento da variabilidade temporal dos eventos chuvosos ocorridos na região semi-árida, uma vez que a quantidade de chuva ocorrida no ano de 2004 foi significativa, entretanto, concentrada em um único mês, o que faz com que o volume precipitado seja extravasado para fora da bacia e, principalmente, “sugado” pela atmosfera nos meses subsequentes, conforme ilustrado da **Gráfico 8** que apresenta o déficit hídrico observado na BHEC.

### 5.3 AVALIAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA EXPERIMENTAL

O uso da BHEC para estudos da evaporação em reservatórios apresentou aspectos positivos que auxiliam na avaliação desse fenômeno na região semi-árida com a aplicação dos dados coletados nos diversos métodos de estimativa da evaporação usualmente empregados e definição da representatividade dos resultados obtidos, uma vez que essa aplicação resulta em valores com diferenças significativas principalmente para uma região que tem a evaporação como fator dominante do balanço hídrico.

A definição do método mais adequado de estimativa da evaporação para a região se torna importante devido à carência de dados referentes às variáveis de influência desse fenômeno. Nesse contexto é possível verificar a adequação da utilização de um método ou até ajustar seus parâmetros a partir dos dados de uma bacia experimental.

Entretanto essa metodologia necessita de períodos longos de medição para fornecer resultados mais consistentes. Os primeiros anos de coleta de dados em uma bacia experimentais são importantes para: análise da representatividade dos dados obtidos, verificação da operacionalidade da bacia experimental e do funcionamento da instrumentação implantada, identificação de equipamentos complementares e levantamento detalhado das características da bacia e de seus reservatórios.

Na BHEC, apesar das falhas na medição das variáveis climatológicas, os dados obtidos nesses primeiros anos de projeto, aliados a observações e acompanhamento da dinâmica dos recursos hídricos da região com visitas a campo frequentes, já permitem avaliar a representatividade da BHEC em fornecer informações referentes à região semi-árida.

As características do clima da região semi-árida quanto à extrema irregularidade da distribuição temporal das chuvas foram observada na BHEC, uma vez que, o ano de 2003 apresentou escassez de chuvas acentuada, sem a ocorrência de um evento que provocasse

escoamento nos rios existentes na bacia. O total precipitado anual ficou em torno de 424 mm, com chuvas de maio a julho de baixa intensidade, o que não provocou variações significativas de nível nos açudes da bacia. Já o ano de 2004, apresentou chuvas intensas com eventos de escoamentos significativos e transbordamentos dos três reservatórios da bacia. O total precipitado no mês de janeiro atingiu o valor de 509 mm registrado na Estação 22. Até outubro deste ano já foram registrados 841 mm, o que representa o dobro da altura de chuva registrada no ano anterior.

As taxas de evaporação calculadas para a BHEC também são características da região representada, configurando elevados índices de perda de água armazenada em reservatórios por esse fenômeno.

Para a região semi-árida, o atendimento das demandas torna-se um problema crítico devido à ocorrência de secas periódicas e a intermitência dos cursos d'água. Por outro lado as garantias necessárias ao fornecimento de água, para essas demandas, se dá basicamente através das águas armazenadas em reservatórios, a custa de elevada perda desse recurso pelo fenômeno da evaporação. Esse cenário foi observado na BHEC, uma vez que apresenta três reservatórios e inúmeros "tanques" na sua área de drenagem, que tiveram seus níveis de água bastante reduzidos devido à evaporação. O reservatório de Nenenzinho apresentou níveis mínimos no final de 2003 e acentuada degradação na qualidade da água. A existência de um número elevado de açudes, de rios intermitentes, das características de sua vegetação e problemas de escassez de água confirmam essa representatividade.

No que se refere à verificação da operacionalidade da bacia experimental, observou-se que a distância da bacia experimental possibilitou visitas periódicas onde em apenas um dia era feito o trabalho de coleta de dados e manutenção dos equipamentos. Os locais de implantação dos equipamentos foram adequados quanto à distribuição espacial para caracterização da irregularidade na ocorrência das chuvas e do comportamento hidroclimatológico da bacia e

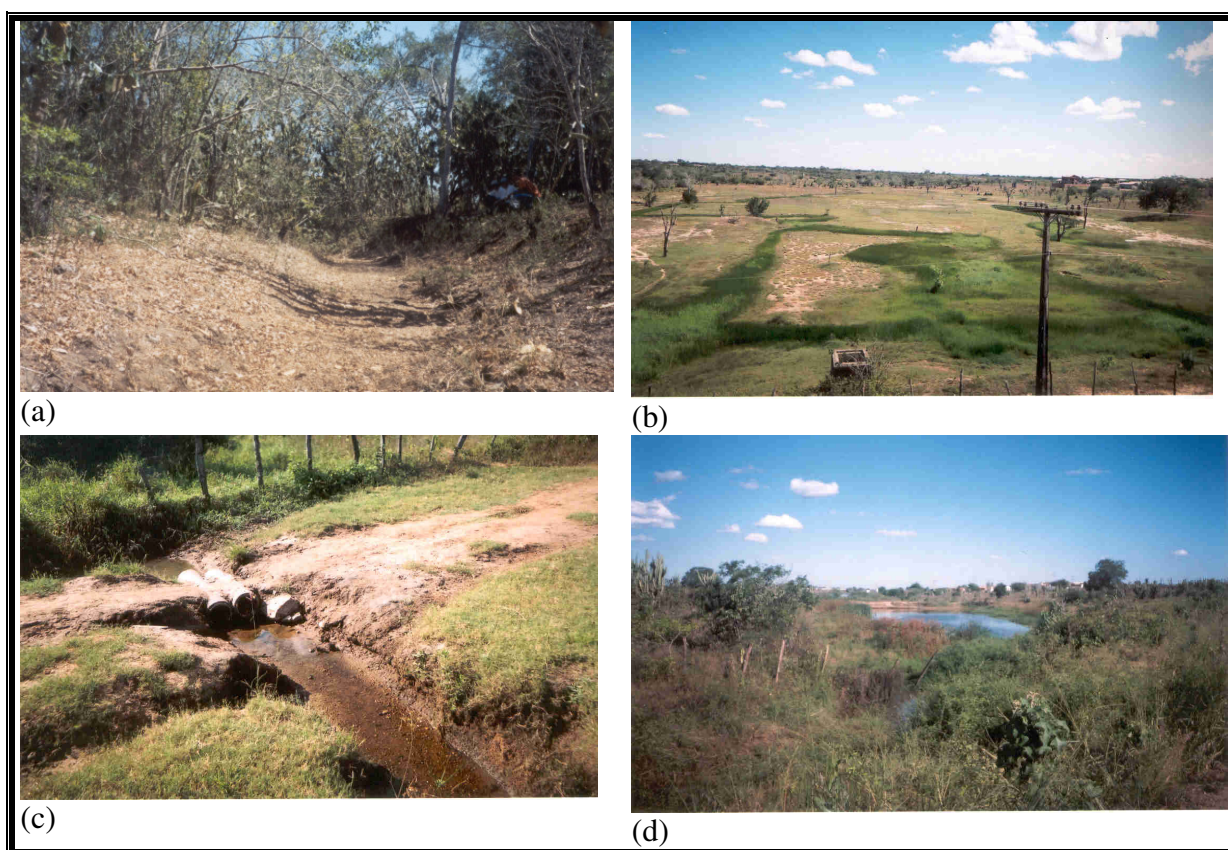
ainda no que se refere à segurança dos equipamentos, não sendo registrado atos de vandalismo, a exceção do açude São Domingos que é utilizado por banhistas que praticam saltos do píer existente e retiraram as réguas instaladas no local. Entretanto, a escolha do local de implantação das calhas Parshall para elaboração do balanço hídrico do reservatório de Flori não foi apropriado uma vez que esses equipamentos foram alagados na ocorrência de fortes chuvas. As calhas ficaram no limite da área inundada do açude definido pelo levantamento da topografia local, sendo recomendado o rebaixamento do vertedouro para diminuir o espelho d'água dando uma margem de segurança para operação desses dispositivos de vazão.

Outro problema operacional ocorreu referente às leituras de nível do reservatório de Flori. Por ser o mais distante da cidade, não foi encontrado um observador que realizasse a leitura diária das réguas linimétricas, sendo recomendado a instalação de equipamento automático para monitorar essa variável.

Para a elaboração da calibração da curva chave das seções do rio com réguas linimétricas é necessária a permanência de técnico especializado na bacia experimental durante o período chuvoso para poder medir o maior número de valores de vazões possíveis com amplitudes variadas.

A elaboração do balanço hídrico do reservatório de São Domingos também ficou impossibilitada devido às características peculiares desse açude. Para esse procedimento é necessário controlar: (i) as vazões afluentes (**figura 24.a**) drenada pelo rio do Cedro, (ii) as perdas a jusante do reservatório, provavelmente devido a não estanqueidade do barramento (**figura 24.b**); (iii) o volume extravasado, (iv) uma entrada de água secundária (**figura 24.c**) que recebe além da contribuição da drenagem natural, água tratada proveniente do extravasamento do reservatório de distribuição de água da cidade de responsabilidade da Empresa Baiana de Água e Saneamento – EMBASA. Essa água é coletada e direcionada para o açude de São Domingos passando por tanques de cultivo de peixe, chegando a um açude

menor (**figura 24.d**), e em seguida para o açude São Domingos. No período seco essa contribuição foi verificada em várias visitas, configurando a única fonte para a vazão observada na **Figura 24.c**. As retiradas de água do açude durante o período de estudo foram variadas sem possibilidade de monitoramento, uma vez que foi utilizada na recuperação da rodovia de acesso à cidade, sem frequência definida, foi bombeada para irrigar cultivos ao redor do açude e esporadicamente retirada para fins urbanísticos.



**Figura 25: Entradas e saídas de água do açude de São Domingos**

Dessa forma constatou-se a complexidade apresentada por esse açude, necessitando de recursos adicionais para proceder ao controle dessas variáveis. A complexidade apresentada faz parte de um cenário comum no semi-árido, ou seja, águas armazenadas desprezadas devido à qualidade inadequada para consumo, deixadas sem manejo, sob ação da evaporação causando perdas de quantidade e agravando a qualidade.

O funcionamento da instrumentação implantada foi prejudicado pelo defeito de fábrica apresentado em todos os equipamentos automáticos, o que leva a considerar a necessidade de equipamentos convencionais para suprir as falhas apresentadas na medição automática, uma vez que o conserto de equipamentos automáticos é demorado; e como a leitura é feita sem acompanhamento contínuo, só no dia da coleta dos dados, a identificação de problemas na leitura dos sensores não é imediata, podendo configurar uma falha de dados no período entre uma coleta e outra.

Diante dessas considerações percebe-se como desvantagem do uso de bacias experimentais para o estudo da evaporação o seu custo e dificuldades de implantação e operação. Entretanto, os resultados obtidos podem proporcionar ganhos maiores em relação à eficiência do manejo das águas armazenadas.

Outro fator a ser considerado no uso de bacias experimentais para estudo da evaporação em reservatórios é a grande dependência desse fenômeno com as características desse sistema de armazenamento de água tal como sua profundidade e a qualidade da água, não possibilitando a transposição direta das informações geradas nos reservatórios da bacia experimental. Essas informações servem para o entendimento geral do comportamento da evaporação em açudes do semi-árido orientando a determinação desse fenômeno de forma mais adequada para a região, como também, indicando, através da análise dos efeitos da evaporação nos açudes, ações de manejo das águas armazenadas.

O grande desafio de uma bacia experimental é o controle de todas as variáveis que influenciam um determinado processo que se quer estudar, devido à inter-relação entre os diversos processos naturais e a dependência do comportamento dessa bacia em relação à ação antrópica, que pode alterar ou até invalidar os resultados obtidos, mudando o cenário no qual está se trabalhando.

Na bacia experimental estudada, o acompanhamento das interferências na coleta dos dados possibilitou o controle da qualidade dos dados e o conhecimento das incertezas que ficaram embutidas nas informações geradas. Isso tem uma significativa importância no estudo da evaporação por ser um fenômeno complexo que necessita do conhecimento de várias variáveis climatológicas e das características específicas dos reservatórios. Dessa forma apesar da necessidade de um longo período de dados e aprimoramento na instrumentação implantada para que as informações estejam mais precisas, considera-se que os resultados já obtidos com a BHEC norteiam uma melhor estimativa para a evaporação em açudes do semi-árido.

As simplificações e dificuldades na realização da presente pesquisa apresentou-se, conforme listado abaixo.

- ✓ Em relação à definição da radiação líquida, principal variável para o cálculo da evaporação com base em dados climatológicos, tem-se que: (i) as constantes para cálculo da radiação líquida não foram ainda calibradas para a área de estudo, sendo utilizados os valores sugeridos pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em Tucci e Beltrame (2000); (ii) a irradiação foi calculada utilizando os valores das constantes indicados para clima tropical em Tucci e Beltrame (2000); e (iii) os valores da radiação incidente no topo da atmosfera foram os dados tabelados mês a mês para a latitude 12°S do Manual de Meteorologia citado em Tucci e Beltrame (2000).
- ✓ A falta de informação dos perfis de temperatura no lago obrigou a realização das seguintes simplificações para a aplicação dos métodos do Balanço de Energia, Penman e Priestley e Taylor: (i) a temperatura da água foi substituída pela temperatura do ar; e (ii) a taxa de variação da entalpia da água do lago foi desprezada. Outra simplificação na aplicação desses métodos foi a determinação



da razão de Bowen B, que foi calculada como sendo igual a razão  $\gamma/\Delta$ , função direta da temperatura e umidade do ar.

- ✓ A velocidade do vento a 2 metros de altura necessária para aplicação do método de Penman foi estimada a partir do dado de velocidade do vento medida na estação climatológica a 3 metros de altura.
- ✓ O método de Morton desconsidera os efeitos da velocidade de vento na evaporação do lago. Entretanto, os valores dessa variável na BHEC, com medidas chegando a 7 m/s, indicam que o processo aerodinâmico de influência na evaporação pode ser significativo para a área de estudo não devendo ser desprezado.
- ✓ A aplicação do balanço hídrico dos reservatórios foi prejudicada pela dificuldade de medição diária da variação no nível desses reservatórios e pelas chuvas intensas ocorridas no período de janeiro de 2004, que impossibilitou a medição das vazões afluentes por danificar os equipamentos de medição.
- ✓ No que se refere à infiltração, foi considerado que, devido à área estar sob embasamento cristalino e não haver vegetação verdejante a jusante do barramento, o que indicaria alimentações subterrâneas, esse valor foi desprezado nos cálculos do balanço hídrico do reservatório, assim como a dessedentação animal.
- ✓ As leituras feitas por observador local apresentaram dados duvidosos tanto para a série do Tanque Classe A como para as régua linimétricas instaladas nos açudes. Para o Tanque foi verificado que para os dias com eventos de chuva os valores observados não representam a evaporação.
- ✓ A manutenção dos equipamentos, incluindo capinação, limpeza dos equipamentos, lavagem e controle do nível d'água do Tanque Classe A que interferem nos dados coletados, só era verificada nas viagens a campo que ocorria com uma frequência

média quinzenal. Em algumas viagens foram constatados que essa manutenção não era feita adequadamente.

Diante das limitações embutidas na presente pesquisa e das conclusões geradas, tem-se como recomendações os itens a seguir.

- ✓ A radiação líquida deve ser determinada a partir dos dados medidos na área de estudo sem necessidade do uso de valores tabelados apresentados na literatura, assim como, a determinação da razão de Bowen deve ser realizada a partir da medição do calor latente e calor sensível, a exemplo da utilização do instrumento portátil a bateria proposto por Novaes e Bignell (1989), indicado para áreas remotas.
- ✓ Para a aplicação mais precisa dos métodos é necessária a medição das variáveis climatológicas no ambiente do lago assim como dos perfis de temperatura no lago, apenas o método de Morton permite a utilização de dados de terra sem incorrer em simplificações da aplicação.
- ✓ De posse das variáveis de influência do Balanço de Energia e Balanço Hídrico indica-se estes métodos como base para validação dos estudos de evaporação. Naturalmente, para que se possa validar qualquer modelo de evaporação em lago, é necessário instrumentar adequadamente vários reservatórios para se obter uma medição precisa da evaporação a partir da elaboração dos balanços de água e energia, que são teoricamente exatos, mas, para alcançar uma precisão maior, extremamente dispendiosos. Nesse aspecto, os reservatórios do semi-árido são mais convenientes, uma vez que a equação do Balanço Hídrico fica bastante simplificada durante as secas, quando não há entrada de água e a saída é devida apenas à evaporação e retiradas para atendimento a demanda.

- ✓ A avaliação da evaporação de reservatório a partir do Tanque Classe A deve observar a variação do coeficiente de passagem ( $K_c$ ) em função da variação do nível do reservatório, uma vez que para um reservatório cheio as condições das variáveis climatológicas em cima do lago são diferentes das condições criadas por um reservatório com baixos níveis de água. Neste caso, ao reduzir o volume, a água pode se tornar barrenta, com maiores concentrações de partículas, o que modifica também a evaporação.
- ✓ Para uma avaliação mais precisa da evaporação indica-se o estudo detalhado da influência do vento nesse fenômeno para a região. Cabe observar que segundo Morton (1983a) as observações da velocidade do vento em terra são extremamente sensíveis ao peso do instrumento, rugosidade da superfície e obstruções vizinhas, o que não possibilita uma boa estimativa da velocidade do vento para o ambiente do lago. Desta forma o uso de observações rotineiras de velocidade de vento em terra pode gerar erros significantes.
- ✓ Devido à dificuldade de se arranjar um observador que realizasse a leitura diária das régua linimétricas com a devida qualidade é recomendado a instalação de equipamento automático para monitorar essa variável. Entretanto não devem ser descartadas as medidas convencionais, pois confirmam as leituras automáticas e, caso haja problemas nos equipamentos, como ocorrido na BHEC, não gera um período sem monitoramento.
- ✓ No que se refere à identificação de equipamentos complementares, foi constatada, para estudo da evaporação em açudes, a necessidade de complementar a instrumentação da BHEC com: (i) sensores de temperatura da água formando um perfil da variação térmica do açude; (ii) radiômetro que fornece medição direta da radiação líquida, observando o cuidado com a fragilidade do equipamento ao

ataque de pássaros e (iii) estação climatológica no ambiente do lago para realização de comparação entre os resultados obtidos com a aplicação de dados do ambiente terrestre e verificação da consistência dos valores usualmente utilizados para cálculo de volumes evaporados em reservatórios. Estas recomendações requerem uma aplicação significativa de recursos financeiros, não disponível para a presente pesquisa.

- ✓ Entende-se que o reservatório de São Domingos deveria ser objeto de estudos mais aprofundados por acumular um grande volume de água para a região, sem uso econômico apropriado.
- ✓ O período de estudo englobou um ano de extrema seca e outro com chuva abundante, mas concentrada em praticamente onze dias. Isso determina que o problema maior do semi-árido é a variabilidade temporal da ocorrência da chuva e não a simples escassez de água. Nesse cenário surge a necessidade de aumentar o tempo de permanência da água proveniente desses períodos curtos de intensa chuva na bacia, com uma gestão eficiente da água de chuva, investindo em grandes armazenamentos que estejam protegidos da ação da evaporação.
- ✓ Com a bacia experimental essa variabilidade temporal e espacial da chuva no semi-árido foi bem acompanhada, fornecendo dados para uma avaliação dos volumes precipitados. Recomenda-se uma análise detalhada dos eventos chuvosos medidos na bacia experimental, possibilitando extrair diretrizes de gestão para o manejo mais eficiente desse volume em regiões hidroclimatologicamente semelhantes.

## 6 CONCLUSÃO

A aquisição de dados medidos e rigorosamente monitorados para o semi-árido são de suma importância para o estudo dos recursos hídricos dessa região. Estudos em bacias experimentais configuram uma alternativa viável para realização de pesquisas que visem geração de informação para subsidiar o processo de gestão das águas dessa região.

A Bacia Experimental do Rio do Cedro está monitorada para suprir essa deficiência de dados, necessitando, entretanto, da continuidade das medições para confirmação das análises realizadas e aquisição de dados mais consistentes e contínuos de forma que as informações obtidas possam auxiliar no manejo mais eficiente dos recursos hídricos.

A presente pesquisa é relativa aos primeiros anos de dados gerados na bacia experimental, inclusive englobando a fase de implantação e calibração, portanto o cálculo da evaporação em reservatórios tem caráter preliminar que deve ser avaliado com cautela.

Apesar do pequeno volume de dados desse trabalho, o conhecimento da qualidade da informação gerada se dá de forma concreta, ou seja, cada análise está vinculada ao conhecimento de como esse dado foi coletado, quais as incertezas e a precisão inerentes, validando as informações geradas.

Os dados disponíveis na bacia para esses primeiros anos de implantação e de operação da bacia experimental do rio do Cedro não foram suficientes para uma avaliação definitiva de seleção do método mais indicado para representar o comportamento da evaporação na área de estudo.

Os resultados obtidos indicam, para uma caracterização preliminar da evaporação na região, a utilização do método de estimativa de evaporação no lago proposto por Morton, por ter sido o método que menos utilizou valores tabelados de outra região e simplificações.

Os valores encontrados pelos métodos de Balanço de Energia (3,34 mm/dia), Priestley e Taylor (4,04 mm/dia) e Penman (3,99 mm/dia) foram significativamente inferiores às medidas do Tanque, indicando que as simplificações realizadas para o cálculo da evaporação potencial subestimaram esse fenômeno na área de estudo, devendo ser investigado os parâmetros desses métodos representativos para a região com o objetivo de validar os valores encontrados de evaporação.

Os valores estimados pelo balanço hídrico (6,31 mm/dia) foram superiores aos demais, coerente com a consideração que nesses valores estão embutidas as perdas eventuais por retiradas de água para atendimento à demanda e possível infiltração ocorrida na área do reservatório.

As medidas de Tanque Classe A foram em média 18% superiores às estimativas pelo método de Morton, considerando o período coincidente de dados em dias não chuvosos, levando a um coeficiente de passagem ( $K_c$ ) igual a 0,82. Esse valor deve ser considerado como preliminar, embutida a necessidade de avaliações futuras com a aquisição de dados mais consistentes.

Conforme levantado na literatura pesquisada, a estimativa da evaporação nos reservatórios do semi-árido é realizada a partir de um conjunto de dados semelhante aos da BHEC com menor discretização temporal ou muitas vezes medidos longe da área de estudo, sendo também em alguns casos com base apenas na temperatura local. Os resultados obtidos na presente pesquisa indicam que o estudo referente a esse complexo fenômeno necessita de uma gama de informações que não estando disponíveis geram taxas de evaporação duvidosas, já que a depender do método escolhido tem-se valores significativamente diferentes. Diante desse contexto percebe-se a necessidade de pesquisa em bacias experimentais adequadamente aparelhada para avaliar a performance dos métodos, definindo qual o erro imposto nos resultados devido às simplificações nos cálculos ou ainda para adaptar os parâmetros utilizados para melhor representar a evaporação em açudes do semi-árido.

As características físicas e climatológicas da BHEC levantadas durante o período de estudo indicam que essa unidade de pesquisa apresenta representatividade satisfatória para subsidiar estudos da evaporação em região semi-árida.

Diante do cenário característico das bacias hidrográficas localizadas na região semi-árida referente à carência de dados hidroclimatológicos, a utilização de bacias hidrográficas experimentais é um instrumento eficiente para a estimativa do comportamento hidroclimatológico característico de bacias do semi-árido desprovidas de equipamentos que possibilitem esse conhecimento. Essas bacias experimentais podem subsidiar a regionalização de informações do processo de evaporação em reservatórios, aprimorando os métodos de cálculo da evaporação, visto que o estudo desse fenômeno envolve um conjunto de variáveis, muitas vezes de difícil determinação.

Entende-se que muitos estudos podem ser realizados nessa unidade de pesquisa com a complementação da investigação física da área, como, por exemplo, geologia e vegetação, assim como a instrumentação com equipamentos de umidade do solo que já foram adquiridos e estão sendo calibrados para estudos de infiltração, aperfeiçoando o balanço hídrico dos reservatórios.

## REFERÊNCIAS

- ANDO, Y., MUSIAKE, K., TAKAHASI, Y. **Modelling of hydrologic processes in a small urbanized hillslope basin with comments on the effects of urbanization.** Journal of hydrology, v. 68, p. 61-83, 1984. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- ANDO, Y., MUSIAKE, K., TAKAHASI, Y. **Modelling of hydrologic processes in a small natural hillslope basin, based on the syntheses of partial hydrological relationship.** Journal of hydrology, v. 64, p. 311-337, 1983. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- ANDRADE, E.G.C.; MATTOS, A. **Perdas de água por evaporação na lagoa do Bonfim-RN no verão de 2000: uma análise pelo método de Penman.** In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 5., 2000, Natal. Anais... Natal: ABRH, 2000. 1 CD.
- ASSOULINE, S; MAHERER, Y. **Evaporation from lake Kinneret: 1 Eddy correlation system measurements and energy budget estimates.** Water Resour. Res. V.29, n.4, p. 901-910, 1993.
- BAHIA. Superintendência de Recursos Hídricos. **Plano Diretor de Recursos hídricos Bacia do Médio e baixo Paraguaçu.** Volume VI – Documento Síntese. Bahia . Salvador 1996.
- BALEK, J.; BURSİK, M. **Groundwater recharge processes in sedimentary structures of the cretaceous basin.** Journal of hydrology, v. 111, p. 225-234, 1989. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- BENT, G.C. **Effects of forest-management activities on runoff components and groundwater recharge to Quabbin reservoir, central Massachusetts.** Forest Ecology and Management. v. 143, p. 115-129, 2001. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/foreco>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- BORGA, M.; FONTANA, G.D.; CAZORZI, F. **Analysis of topographic and climatic control on rain-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index.** Journal of hydrology, v. 268, p. 56-71, 2002. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 brasileira – Bases para discussão.** Brasília, 2000. 196 p;
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere.** Holland: D. Reidel Publishing Company, 1982.
- CADIER, E. **Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste semi-árido.** Recife, SUDENE.DPG.PR.N, 1994. 448 p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 31). “Convênio SUDENE/ORSTOM”.
- CAMPOS, J.N.B. et al. **Contribuições ao Debate sobre as eficiências de Pequenos e grandes reservatórios.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.8 n.2 p.31-38, 2003.



DIAS, N.L.C. **Estimativas climatológicas de evaporação em lagos**. 1986. 175p. Dissertação (Mestrado) – Universidade federal do Rio de Janeiro, 1986.

FONTES, A.S.; OLIVEIRA, J.I.R. de; MEDEIROS, Y.D.P. **A evaporação em açudes no semi-árido nordestino do Brasil e a gestão das águas**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15. 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ABRH, 2003. 1 CD.

GUILHON, L.G.F. **Cálculo das vazões evaporadas nos reservatórios dos aproveitamentos em operação**. Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos, 1998, Gramado. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/iph/simposio/>>. Acesso em: 10 ago. 2002.

GUPTA, V.K. **Emergence of statistical scaling in floods on channel networks from complex runoff dynamics**. Chaos, Solitons e Fractals. v. 19, p. 357-365, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>> Acesso em: 5 fev. 2004.

HUDSON, J. A. **The impact of sediment on open channel flow measurement in selected UK experimental basins**. Flow Measurement and Instrumentation. v. 15, p. 49-58, 2004. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/flowmeasinst>> Acesso em: 5 fev. 2004.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.H. **Applied hydrology**. McGraw-Hill, 1958. (Mcgraw-Hill Civil Engineering Series)

LIRA, G.A.R. et al. **Bacia Experimental do Rio Guaraira: Implantação e primeiros resultados**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15. 2003, Curitiba. Anais... Curitiba: ABRH, 2003. 1 CD.

LOPES, J.E.G.; CONEJO, J.G.L. **Dimensionamento de reservatórios em regiões de alta evaporação**. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 7. e Simpósio Brasileiro de Hidráulica e recursos Hídricos, 3. 1987, Salvador. Anais..., v. 1, p. 667-677. São Paulo: ABRH, 1987.

MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Série Brasil. SUDENE.Hidrologia. Recife, série.25, 1989. p. 11 A 70.

MORTON, N.F.I. **Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology**. Journal of Hydrology, v. 66, p.1-76, 1983a.

MORTON, N.F.I. **Operational estimates of lake evaporation**. Journal of Hydrology, v. 66, p.77-100, 1983b.

MUSIAKE, K.; OKA, Y.; KOIKE, M. **Unsaturated zone soil moisture behavior under temperate humid climatic conditions – tensiometric observations and numerical simulations**. Journal of hydrology, v. 102, p. 179-200, 1988. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.

NOVAES, A.B.; BIGNELL, K.J. **The sensible and latent heat fluxes for Gurupi River Basin – Amazônia – and some locations of Northeast Region of Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 10(2), p. 97-108, 1993.

NOVAES, A.B.; BIGNELL, K.J. **Improved instrumentation for measuring the Bowen ratio**. Revista de Física Aplicada e Instrumentação, v. 4, n° 2, p. 83-101, 1989.

- OBLED, C.; WENDLING, J. BEVEN, K. **The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation observed data.** Journal of hydrology, v. 159, p. 305-333, 1994. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas.** Rio de Janeiro, 2001. 80p. RE 3/159/2001.
- PAIVA, J.B.D. de; PAIVA, E.M.C.D de (Org.). **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2001. 625p.
- QUADRO, M. F. L et al. **Climatologia de Precipitação e Temperatura.** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE. Disponível: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 13 mar. 2002.
- REIS, R.J.; DIAS, N.L.C. **Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations.** Journal of hydrology, v. 208, p. 135-147, 1998. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 15 mar. 2003.
- ROQUE, R. O.; SANSIGOLO, C.A. **Estimativas de evaporação do lago de Taquaraçu, SP pelo Modelo Conceitual de Morton.** São Paulo: INPE, 2001. p. 21-28 (Coleção ABRH; v.6)
- SACKS, L.A.; LEE, T.M.; RADELL, M.L. **Comparison of energy-budget evaporation losses from two morphologically different Florida seepage lakes.** Journal of Hydrology, v.156, p.311-334, 1994.
- SAMPAIO, G.; CASTRO, C.; TOMASELLA, J. **A Região Nordeste do Brasil e a Seca. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso em: 13 mar. 2002.
- SILVA, T.J.A. da et al. **Avaliação comparativa da evaporação em dois açudes pelo método do Tanque Classe A.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14., 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. 1 CD.
- SIMON, E.; MERO, F. **A simplified procedure for the evaluation of the lake Kinneret evaporation.** Journal of Hydrology, v.78, p. 291-304, 1985.
- STUDART, T.M.de C. **Análise comparativa dos métodos de Hargreaves e Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial: um caso de estudo.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABRH, 1999. 1 CD.
- TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, L.F.S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2000. p. 253-287. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4). ISBN 85-7025-298-6.
- VALLET-COULOMB, C. et al. **Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia).** Journal of hydrology, v. 245, p. 1-18, 2001. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 25 out. 2002.
- VARDAVAS, I.M.; FOUNTOULAKIS, A. **Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian Lakes in different climatic**

**regions.** Ecological Modelling, v. 84, p. 139-150, 1996. Disponível em:  
<<http://www.elsevier.com>> Acesso em: 25 out. 2002.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia.** 2 ed. Brasília: INMET, Gráfica e Editora Pax, 2001. 532p.

VIEIRA, V.P.P.B. **Desafios da Gestão integrada de Recursos Hídricos no semi-árido.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.8 n.2 p.7-17, 2003.

VIEIRA, V.P.P.B. **Sustentabilidade do Semi-árido Brasileiro: Desafios e Perspectivas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.7 n.4 p.105-112, 2002.

VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K. **Evaporação e evapotranspiração.** In: RAMOS, f. et al. Engenharia hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. cap.3, p 145-197. (Coleção ABRH; v.2).

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1975, p. 245.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. **Hydrology: water quantity and quality control.** Second Edition. New York: 1997.

WOOD, E.F. et al. **Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling.** Journal of hydrology, v. 102, p. 29-47, 1988. Disponível em:  
<<http://www.elsevier.com/locate/hydrol>> Acesso em: 5 fev. 2004.