

BALANÇO HÍDRICO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL DO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO

José Edberto da Silva¹ & Carísia Carvalho Gomes²

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o cálculo do balanço hídrico da Bacia Experimental de Aiuaba, BEA, mais completo, pois leva também em consideração a da parcela de água subterrânea que se soma à parcela de água superficial. A contribuição subterrânea foi computada através de uma análise criteriosa do comportamento dos aquíferos fraturado e sedimentar na BEA. O solo da camada sobreposta às rochas possui características semelhantes ao material de preenchimento das fraturas, sendo um fator a ser considerado na drenagem profunda, visto que é um importante componente do balanço hídrico. Para o estudo, foram realizados vários ensaios, tais como: ensaio petrográfico na rocha, determinação da condutividade hidráulica do meio e ensaios de granulometria do solo e ensaios físico-químicos nas águas dos poços da região que auxiliaram na comprovação das hipóteses levantadas sobre o balanço hídrico da bacia.

ABSTRACT

This work has as objective to present a more complete the water balance calculation of Bacia Experimental de Aiuaba, BEA, therefore it also leads in consideration the groundwater parcel that is added to the superficial water parcel. The groundwater contribution was computed through a multicriteria behavior analysis of the fractured and sedimentary aquifers in the BEA. The overlapping layer soil has similar characteristics to the material that fulfill the fractures, being a factor to be considered in the deep draining, since it is an important component of the water balance . For this study, some tests had been made as: petrographic tests in the rock, determination of the hydraulical conductivity of the grain size test, physical and chemical test in waters from wells of the region that had help in confirming the assumptions made on the water balance of the basin.

Palavras-chave: Água Subterrânea. Aquífero Fraturado. Balanço Hídrico.

- 1) Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará - UFC. e-mail: josedberto@bol.com.br
- 2) Doutora em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos. Professora Adjunta da Universidade Federal do Ceará – UFC. e-mail: carisia@ufc.br

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) é caracterizada por um contexto ecológico frágil com alta variabilidade espacial e temporal das chuvas e elevados índices de evaporação.

Através de estudos geofísicos realizados na região e com informação da água dos poços e cacimbões perfurados no distrito da Barra, nas proximidades da BEA, e ainda, com o levantamento topográfico do local da pesquisa, foi possível determinar a direção e o sentido fluxo subterrâneo nas rochas da região, assim como, calcular o balanço hídrico.

O objetivo geral deste trabalho é realizar o cálculo do balanço hídrico da Bacia Experimental de Aiuaba levando em consideração a parcela da água subterrânea que para tanto foi realizado uma análise criteriosa do comportamento do aquífero fraturado.

Para a computação de todos os fatores necessários para o balanço foram realizados: a quantificação do potencial hídrico do aquífero na bacia; a identificação da disponibilidade hídrica para abastecimento público e agricultura; a estimativa dos volumes de perdas por evaporação; a quantificação das extrações de água subterrânea por ano e quanto representa em termos de precipitação média anual; compilação de dados físicos sobre a Bacia Experimental de Aiuaba, tais como: climáticos, hidrológicos, geomorfológicos, geológicos, ocupação do solo e vegetação.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Apresenta-se, a seguir, uma breve introdução teórica sobre os métodos: Traçadores Químicos (Balanço de Cloretos); Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo EARTH; Balanço Hídrico Sequencial Diário – Modelo BALSEQ; Quantificação das Extrações; Disponibilidades Hídricas e Implicações Agro-Ambientais, e os seus respectivos parâmetros utilizados no cálculo da recarga do SA dos Gabros de Beja, em Portugal.

Traçadores Químicos - Balanço de Cloretos

A recarga aquífera pode ser estimada a partir de traçadores químicos como o Cloreto, que são produzidos naturalmente na atmosfera terrestre. A concentração de Cloreto no solo e até a profundidade radicular da vegetação dominante, aumenta em resultado da evapotranspiração. Para profundidades superiores, permanece aproximadamente constante, podendo ser usado como traçador químico.

A partir do valor das concentrações em cloreto da água da chuva e de amostras de água do aquífero é possível obter um balanço de massa do íon Cloreto, conforme Custódio & Llamas (1996),

assumindo que se trata de um elemento conservativo e que não existem fontes anómalas, naturais ou antrópicas de cloreto:

Balço Hídrico Sequencial Diário – Modelo EARTH

O modelo EARTH é um modelo de avaliação da recarga aquífera e transporte de umidade no solo e zona vadosa que faz uma combinação dos métodos diretos e indiretos de abordagem da recarga.

Segundo Van der Lee & Gehrels, (1990), o modelo EARTH é um modelo de parâmetros hidrológicos utilizado na simulação da recarga e evolução piezométrica sazonal. Está especialmente direcionado para condições de clima semi-árido e permite simular igualmente o escoamento superficial e o caudal de escoamento de pequenas bacias hidrográficas.

O modelo EARTH pode ser aplicado na modelagem de um vasto conjunto de variáveis agro-hidrometeorológicas e hidrogeológicas essenciais para caracterizar o balanço hídrico de um sistema aquífero, nomeadamente no cálculo dos seguintes parâmetros:

- Superhávít hídrico; Escoamento superficial; Teor de umidade do solo e transporte na zona vadosa; Evapotranspiração real; Recarga de aquíferos; Evolução piezométrica.

O módulo SATFLOW proposto por Van der Lee & Gehrels (1990) funciona como um modelo hidrogeológico unidimensional determinístico que utiliza como entrada de dados a recarga calculada nos módulos anteriores. A equação que traduz a oscilação piezométrica é a seguinte:

$$h = RC - \frac{STo}{R} - RC \cdot (h') \quad (01)$$

Em que: h – nível piezométrico [L]; h' – derivada de h em função do tempo [$L.T^{-1}$]; RC – coeficiente de recessão [T]; R – recarga [$L.T^{-1}$]; STo – coeficiente de armazenamento.

O modelo EARTH está direcionado para climas secos com precipitações concentradas em determinados períodos e para aquíferos freáticos ou não confinados, com respostas rápidas aos episódios de recarga.

Balço Hídrico Sequencial Diário – Modelo BALSEQ

O modelo BALSEQ, segundo Lobo Ferreira, (1981) é um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário no nível do solo, para a estimativa da recarga de águas subterrâneas na Ilha de Porto Santo. Este modelo já teve diversas aplicações, por exemplo, na ilha de Porto Santo (Lobo Ferreira *et al.*, 1981), e na península de Setúbal (Oliveira *et al.*, 1994), e a fora de Portugal, por exemplo, na Índia, no Concelho de Bardez, estado de Goa (Chachadi *et al.*, 2001) ou em Kakinada (Chachadi *et al.*, 2002).

Os fundamentos do método são os seguintes:

Para o caso de uma área onde não exista recarga artificial, não haja escoamento superficial a entrar na área e o nível freático se encontre sempre abaixo da profundidade do solo sujeito a

evapotranspiração, a Equação 02 do balanço hídrico, cujo as unidades são milímetros, portanto dimensão [L], para o solo nessa área pode expressar-se

$$P - ETR - DA1 - Ed - Ip = e \quad (02)$$

Em que: P - precipitação [L^3]; ETR - evapotranspiração [L^3]; $DA1$ - variação (*final - inicial*) do armazenamento de água no solo [L^3]; Ed - escoamento superficial [L^3]; Ip - infiltração profunda (infiltração abaixo da espessura do solo) [L^3] e e - erro de cálculo do balanço [L^3].

O balanço hídrico sequencial mede ou estima os termos P , ETR , Ed e $DA1$, calculando Ip pela resolução da Equação 03 considerando $e = 0$.

Quantificação das Extrações

A longo prazo, num sistema em equilíbrio, as extrações de águas subterrâneas equivalem à recarga que ocorre na zona de influência das captações. Por esse motivo, o somatório das extrações é um bom estimador da recarga que ocorreu, com a vantagem de ter um grau elevado de exatidão por ser uma variável mensurável, com possibilidade de não comportar erros de medição.

A área de recarga ou zona de afluência das captações representa no total 20 km², o que significa, em termos médios, que 1 km² do aquífero gabro-diorítico pode fornecer cerca de 80.000 m³ de água subterrânea por ano, embora este valor seja difícil de manter durante os meses de verão e mais ainda após períodos plurianuais de seca (Paralta, 2000).

2.1 Balanço Hídrico

Define-se em termos gerais que balanço hídrico é o balanço de todos os aportes e retiradas de água de um sistema, em determinados intervalos de tempo. No balanço hídrico considera-se a quantidade de água que infiltra, a que evapora, a que transpira, a que percola até o lençol freático e a que é drenada. O resultado deste balanço é a água que fica armazenada no solo. Os principais processos que compõem o balanço hídrico são descritos a seguir.

2.1.1 Precipitação

Na natureza, a superfície da terra recebe a radiação solar durante o dia e se aquece, provocando a evaporação. Durante a noite a superfície da terra se resfria pela perda de calor, com radiação terrestre de ondas longas para o espaço sideral. Quanto maior for o resfriamento da superfície exposta, maior será a adaptação de moléculas de água da atmosfera pela superfície resfriada, ou seja, o orvalho, principalmente sofre a folhagem das plantas. Quando a condensação se dá na própria atmosfera há a formação de nuvens, que podem se precipitar em forma de chuva. A condensação, que é

a passagem da água do estado gasoso para o líquido, representa o fenômeno oposto à evaporação, ou seja, o retorno da água da atmosfera, através da chuva, para o solo.

2.1.2 Evaporação

A evaporação e a transpiração vegetal na natureza, representam a transferência da água da superfície do solo para a atmosfera, ou seja, a passagem do estado líquido da água para o gasoso. Geralmente nos açudes, a superfície é aquecida pelo sol, havendo evaporação. Na vegetação, as folhas são as responsáveis pela transpiração. Em períodos de seca estas caem para evitar perdas. Os lagos com áreas extensas facilitam estes tipos de transferências.

2.1.3 Evapotranspiração potencial

Segundo Camargo (2007), evapotranspiração potencial representa a chuva necessária ao desenvolvimento normal das plantas, de forma a não faltar nem sobrar água para sua vegetação normal. Thornthwaite (1948) chamou-a de evapotranspiração potencial (Etp), que corresponde à quantidade da água que pode passar do estado líquido para o gasoso, em função da disponibilidade de energia solar na região no período considerado. Por essa razão, a evapotranspiração potencial é mais elevada nos trópicos que em região temperada e mais elevada no verão que no inverno.

A evapotranspiração em base potencial é um elemento meteorológico característico da região, como é a temperatura média, o orvalho, a precipitação pluvial, etc. Em climatologia, para avaliar as condições de umidade do clima compara-se a quantidade da chuva ocorrida com a quantidade da chuva necessária. Quando a chuva real for maior que a necessária, no período, o clima pode ser considerado úmido.

Se for o contrário, pode ser considerado seco. Thornthwaite (1948) introduziu em climatologia o conceito de chuva necessária ou evapotranspiração potencial e do balanço hídrico climático ao comparar os dados da chuva com os da evapotranspiração potencial do período considerado.

A quantificação da evapotranspiração potencial, como elemento meteorológico, é bem mais difícil. Sua medição exige o manuseio de evapotranspirômetros, espécie de lisímetros, que devem ser conduzidos durante vários anos por climatologista experiente. Seus resultados são utilizados principalmente para aferir as equações de estimativa da evapotranspiração potencial.

Existem hoje muitas fórmulas para estimativa da Etp. As primeiras e muito eficientes são as de Thornthwaite (1948) e de Penman (1948). A de Thornthwaite, relativamente empírica, é baseada nas causas, fatores astronômicos e geográficos, que condicionam e quantificam a Etp. A segunda é matemática, baseada em princípios físicos e nos efeitos meteorológicos da própria Etp. Ambas as fórmulas são de solução matemática trabalhosa, mas hoje muito facilitada através da informática. A

estimativa de Etp baseada nas suas causas, como a equação de Thorthwaite, foi muito simplificada pela introdução da equação de Camargo (1971), que foi analisada e avaliada por Camargo & Camargo (1983).

Segundo Soares (2004), uma raiz de uma árvore absorve em média $12 \text{ cm}^3/\text{h}$ de água do solo através de suas raízes e evapora aproximadamente 38% deste valor, supondo que suas raízes estão espaçadas cerca de 20 cm. Em média, o valor da absorção de uma árvore que dá frutos é de 250 litros/dia. Este valor varia de acordo com o tipo de árvores, algumas são mais densas, outras mais maleáveis, o fato que este valor é uma aproximação.

2.1.4 Absorção da umidade do solo

A umidade do solo absorvida pelas raízes das plantas é realizada por processo fisiológico, através dos pêlos absorventes. Nesse processo são absorvidos além da água os elementos químicos necessários à fisiologia da planta. Os pêlos absorventes são órgãos vivos que necessitam de oxigênio para respirar. O oxigênio é obtido do ar encontrado entre as partículas do solo, na zona das raízes. Os pêlos absorventes retiram a água das lâminas líquidas que ficam fixas, aderentes às partículas do solo. Essa água não é drenada pela ação da gravidade. A umidade do solo nesta condição está na chamada capacidade de campo, sendo facilmente disponível às plantas.

2.1.5 Irrigação

Irrigação é a aplicação de água sobre o solo feita pelo homem para repor a umidade necessária na zona das raízes. Esta atividade que substitui a chuva favorece o crescimento das plantas. Por exemplo, quando não chove o suficiente ou chove fora de época no verão, que é quando as plantas começam a se desenvolver, acontece um período de estiagem chamado de “veranico”. Nesse caso, a irrigação é necessária para que a planta cresça normalmente. A vantagem da irrigação é garantir ao produtor produzir mais e obter produtos de melhor qualidade sem correr o risco de não haver chuva. A irrigação promove a umidade necessária às raízes e impede que a planta cresça devagar ou seque. Além disso, através da mistura de nutrientes na água da irrigação, consegue-se o perfeito aproveitamento destes pela planta.

2.1.6 Escoamento superficial

A água que precipita nos continentes pode tomar vários destinos. Um deles é o escoamento superficial que ocorre sobre a superfície do terreno. A parte restante penetra no interior do solo, subdividindo-se em duas. Uma parcela se acumula na sua parte superior e pode voltar à atmosfera por evapotranspiração. Outra caminha em profundidade até atingir os lençóis freáticos e vai constituir o escoamento subterrâneo. Tanto o escoamento superficial como o escoamento subterrâneo vão alimentar direta ou indiretamente os lagos e oceanos através do desaguamento ou dos cursos de água que para lá

escorrerão. O escoamento superficial constitui uma resposta rápida à precipitação e cessa pouco tempo depois dela. Já o escoamento subterrâneo, em especial quando se dá através de meios porosos, ocorre com grande lentidão e pode continuar a alimentar o curso de água por longo tempo após ter terminado a precipitação que o originou.

2.1.7 Drenagem profunda

Drenagem profunda é o movimento de água livre contida no solo que escoar pela ação da gravidade. A água em excesso, que escorre ou que se perde por drenagem profunda, é aquela que vai reabastecer os mananciais de água, como os rios, lagos, açudes e também o lençol freático. A drenagem profunda expressa o excesso de água que penetrou no volume de solo, através das chuvas ou irrigação.

2.1.8 Armazenamento de água no solo

O solo é o armazenador e fornecedor de água e nutrientes às plantas. Por fenômenos de absorção e capilaridade, ele retém a umidade das chuvas que as plantas necessitam.

Dependendo do conteúdo de água no solo, as plantas terão maior ou menor facilidade em extrair água. À medida que o solo seca, torna-se mais difícil para as plantas absorver a água. Isso porque vai aumentando a força de retenção. Por isso, nem toda água que o solo consegue armazenar está disponível às plantas.

3.METODOLOGIA

3.1 Métodos para cálculo do Balanço Hídrico

Existem diversos métodos para o cálculo do balanço hídrico, sendo que cada um tem uma finalidade específica. Um dos modelos mais conhecidos foi proposto por Charles Warren Thornthwaite (1948) e posteriormente modificado por John Russ Mather, (1955) que ficou conhecido como Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather. A principal função deste balanço é servir como base para uma classificação climática. O método proposto por Thornthwaite e Mather tem sido amplamente utilizado por possibilitar a previsão da variação temporal do armazenamento de água no solo.

Ele inclui estimativas da evapotranspiração real, déficit hídrico e excedente hídrico. Esse método considera ainda que a taxa de perda de água por evapotranspiração varia linearmente com o armazenamento de água no solo.

3.2 Clima e vegetação

A principal cobertura vegetal do semi-árido nordestino é a caatinga, sendo reconhecida como uma das 37 grandes regiões naturais do planeta, conforme estudo coordenado pela *Conservation International* (TABARELLI; SILVA, 2003 apud Costa, 2007).

A Caatinga é considerada como único bioma exclusivamente brasileiro, grande parte do seu patrimônio biológico não pode ser encontrado em nenhum outro lugar do planeta. Este bioma ocupa

uma área de 895 mil quilômetros quadrados, da área total do Nordeste, englobando a maior parte do Estado da Paraíba, parte do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. Na Paraíba, dois terços da área total do Estado correspondem ao ecossistema Caatinga. Rica em biodiversidade e espécies endêmicas, a Caatinga abriga animais e plantas adaptados à escassez de água. (CAVALCANTE, 2006)

3.2.1 Ambiente Fisiográfico do Bioma Caatinga

As unidades fitoecológicas que se estabelecem nesses solos variam desde a caatinga arbórea (ou floresta caducifólia espinhosa) e a caatinga arbustiva aberta, até a mata subcaducifólia tropical pluvial e a vegetação xerófila de carrasco, na região serrana.

A Caatinga apresenta três estratos: arbóreo (8 a 12 metros), arbustivo (2 a 5 metros) e o herbáceo (abaixo de 2 metros). A vegetação adaptou-se ao clima seco para se proteger. As folhas, por exemplo, são finas ou inexistentes. Algumas plantas armazenam água, como os cactos, outras se caracterizam por terem raízes praticamente na superfície do solo para absorver o máximo da chuva. Algumas das espécies mais comuns da região são: Amburana, Aroeira, Umbu, Baraúna, Maniçoba, Macambira, Mandacaru e Juazeiro.

Quando chove, no início do ano, a paisagem muda. As árvores cobrem-se de folhas e o solo fica forrado de pequenas plantas. A fauna volta a engordar.

A BEA possui duas classes de vegetação principais: Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Densa e Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Aberta. A primeira tem elementos arbóreos de até 8,5 m e espécies escandentes, a segunda possui árvores emergentes e esparsas com alturas entre 8 e 10 m. Ambas possuem espécies arbustivas altas entre 5 e 7 m, contudo, na primeira, tais árvores são encontradas mais densamente (LEMOS, 2006, apud Costa, 2007).

De acordo com Lemos, (2006), a vegetação de Aiuaba é variada, existindo árvores de grande porte que consegue retirar água a grandes profundidades, fato que as mantêm folhosas o ano inteiro. Dentre estas árvores está a *Chinopsis Brasiliensis*, conhecida como “Baraúna/ Maria-Preta”. (Figuras 01 E e F). Este tipo de vegetação apresenta raiz que conseguem atingir grandes profundidades. Outro nome para esta árvore é Guaraúna, Ibiráúna, Maria-preta-da-mata, Muiraúna, Paravaúna e Rabo-de-macaco. O nome indígena “Baraúna” significa madeira preta. Esta árvore, mesmo em períodos de estiagem, consegue manter-se “verde”, folhosa, significando que conseguem retirar água do solo a grandes profundidades.

Segundo Cardoso et. al. (1996) do Laboratório Geoambiental do Cariri, dentre as espécies que predominam em relação aos parâmetros de abundância em Aiuaba-Ce, são em ordem de IVI (Índice de Valor de Importância), *Cróton sonderianus* (73,3 %) – Marmeleiro (Figura 01 D), *Croton*

conduplicatus (33,1 %) – Quebra-faca, Bauhinia cheilantha (31,8 %) - Mororó, Caesalpinia pyramidalis (27,5%) – Caatingueira (Figura 01 A), Cordia globosa (18 %) – Maria-preta/baraúna e Myracrodruon urundeuva (15,8 %) - Aroeira, onde: NI = Número de Indivíduos; DR = Densidade relativa; DoR = Dominância Relativa; FR = Frequência Relativa; IVI = Índice de valor de importância, conforme Tabela 01. Além destas árvores, existem também em Aiuaba, Craibeira (Figura 01 B) e Umbuzeiro (Figura 01 C). Existem aproximadamente 1.332 (um mil trezentos e trinta e duas) árvores na região em estudo de porte médio.

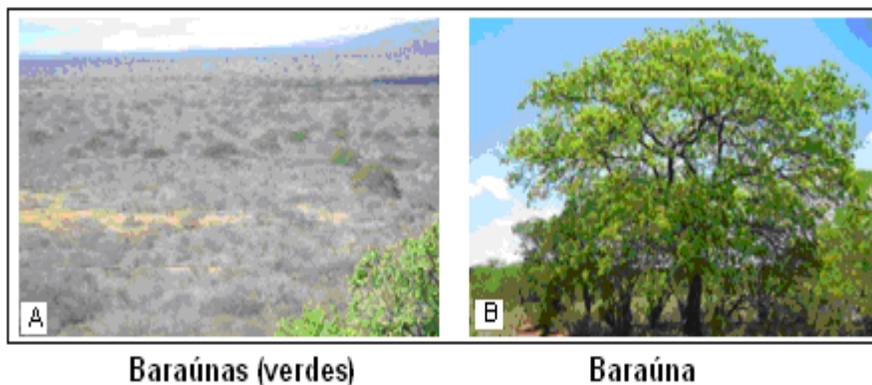


Figura 01 Vegetação do tipo Baraúna

4. RESULTADOS

4.1 Balanço Hídrico da BEA

O cálculo do Balanço Hídrico é bem simplificado se comparado com os aspectos complexos que influenciam o balanço hídrico de bacias da região Nordeste.

Em Aiuaba, foram medidos ou estimados os parâmetros hidrogeológicos necessários para entrada de dados do balanço hídrico.

A área da bacia é de aproximadamente 12 km² e seu perímetro, 15,22 km. No cacimão Luiz Eudo, mediu-se a espessura da camada de solo acima do embasamento rochoso, como pode ser visto nas Figuras 02 (A e B) corresponde a 14 m. De acordo com os estudos realizados na região, em alguns locais a rocha aflora, geralmente nos locais íngrimes, com inclinações aproximadas de 20°, como encostas de serras, etc. e em outros locais, como vales, a espessura de solo acima da rocha aumenta. Como o cacimão Luiz Eudo localiza-se na periferia da BEA, assim como a cacimba da Estação Ecológica, que também tem uma espessura média de solo de 14 m, é possível estimar, de um modo geral, o volume médio de solo sobre a rocha, considerando todos os seus componentes, partículas sólidas, água e ar, é $V_{\text{médio}} = 12 \text{ km}^2 \times 0,014 \text{ km} = 0,168 \text{ Km}^3$, ou 168.000.000 m³.

O teor de umidade natural deste solo foi determinado em Laboratório com o uso de estufa, e apresenta valor médio de 5,59 %.



Figura 02 (A e B) Cacimbão Luiz Eudo

4.1.1 Cálculo do Índice de Vazios do Solo (e)

Segundo Lambe, et al (1979), a condutividade hidráulica pode ser determinada pela Equação 03:

$$K = (D_s)^2 \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} C \quad (03)$$

Em que: K = condutividade hidráulica [L.T⁻¹]; D_s = diâmetro do tubo onde se encontra a amostra [L]; γ = massa específica [M.L⁻³]; μ = viscosidade da água [M.L⁻¹.T⁻¹]; e = índice de vazios; C = fator constante (função do tipo de solo).

A Equação 03 foi desenvolvida por Taylor, utilizando a Lei de Poiseuille e considerando a porosidade do solo. Os valores de “e” podem ser determinados utilizando-se o ábaco da Figura 03, onde se entra com a permeabilidade na parte inferior do ábaco e com o tipo de solo, encontrando-se o índice de vazios na coordenada vertical.

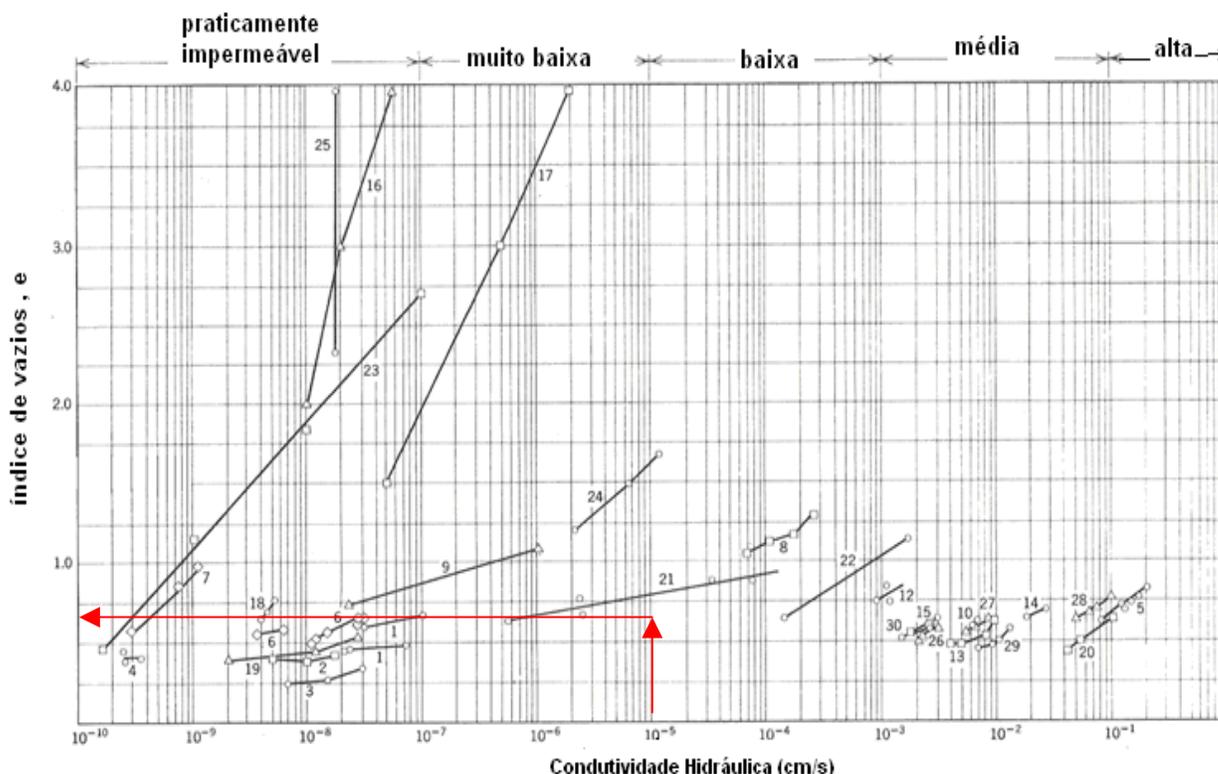


Figura 03 Ábaco de Condutividade hidráulica x índice de vazios

Fonte: Lambe *et al.* (1979)

A condutividade hidráulica determinada no ensaio de bombeamento no Poço Luiz Eudo é $K = 4,17 \times 10^{-4}$ cm/s, e considerando que os aquíferos fraturados na área da BEA, tem características semelhantes, atribuiu-se este valor para toda a bacia. Com este dado, entra-se no Ábaco (Figura 76), traçando-se uma perpendicular ao eixo horizontal, encontrando a reta 21, correspondente a um material fino, semelhante a areia-siltosa. Este material é encontrado na Carolina do Norte (EUA), sendo comparado também ao silte, por causa de suas dimensões. Traçando-se uma perpendicular ao eixo vertical, encontra-se um valor para o índice de vazios $e = 0,8$.

Utilizando-se a expressão: $n = \frac{e}{1+e}$, para a porosidade n , encontra-se o valor de 44,4% .

Assim, para as camadas de solo com volume $V_{\text{médio}} = 168.000.000 \text{ m}^3$, ter-se-á $74.592.000 \text{ m}^3$ de volume de vazios, que podem ser preenchidos com água e/ou ar. Logo o volume máximo de água que pode ser armazenado no solo pode chegar a este valor.

4.1.2 Componentes do Balanço Hídrico da BEA

Os fatores considerados no balanço hídrico são: (1) evaporação, (2) precipitação, (3) evapotranspiração potencial, (4) absorção de umidade do solo, (5) irrigação, (6) escoamento superficial, (7) armazenamento d'água no sub-solo e (8) drenagem profunda. Alguns destes parâmetros

são mostrados na Figura 04 (A), onde pode-se visualizar também a zona de aeração e a zona de saturação. Na zona de aeração normalmente, os vazios do solo são preenchidos com ar e na zona de saturação, os vazios do solo são preenchidos com água. Mas isto não quer dizer que na zona de aeração não tenha umidade, pelo contrário, nesta zona, em períodos chuvosos, passa toda a água que abastece o aquífero, assemelhando-se a uma zona de saturação. Esta zona, que fica abaixo do lençol freático, está totalmente enxarcada, cujos vazios do solo e da rocha são preenchidos com água.

O nível do lençol freático nas proximidades do Cacimbão Luiz Eudo é de 8,5 m a partir da superfície. Como este cacimbão foi escavado com profundidade de 14 m, a zona de saturação tem em média 5,5 m nos períodos sem chuva.

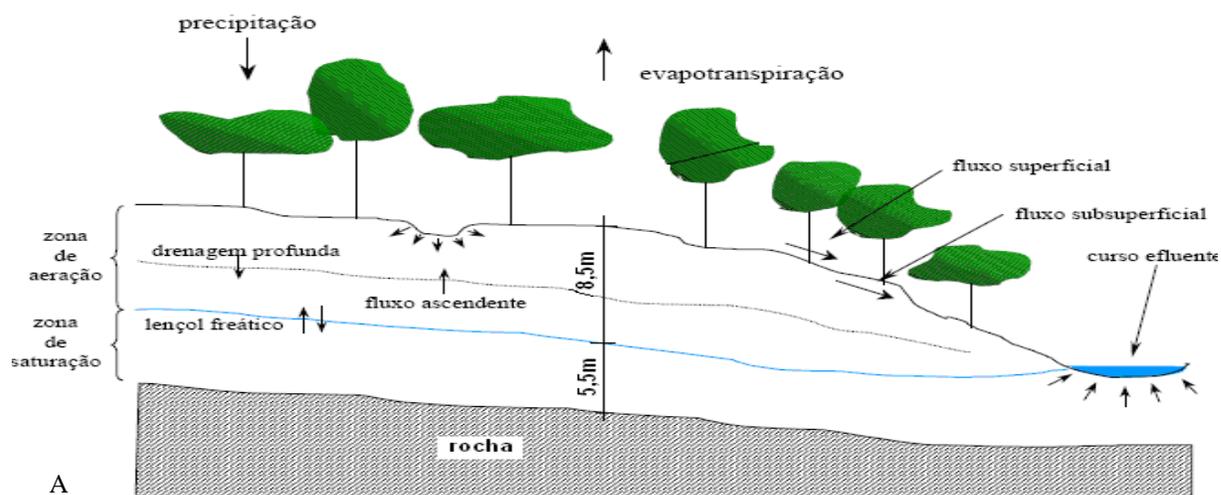


Figura 04: (A) Parâmetros do balanço hídrico e (B) Açude Boqueirão em Aiuaba

a. Evaporação

Na região pesquisada, a evaporação nominal, I , no açude Boqueirão, atinge em média 2.000 mm/ano (Costa, 2007). Mas, não se deve comparar evaporação dos lagos com as evaporações do solo, que são muito pequenas, cerca de 4 mm nas camadas de 0 a 10 cm e menos de 1 mm nas camadas de 10 a 30 cm do solo, durante o ano (Andrade, 1981). Se comparadas com a evaporação dos lagos,

estes valores não chegam a 0,05%. Não foi considerada a ação vento, atuando no solo, que aumentaria ainda mais a taxa de evaporação.

b. Precipitação

Os valores da precipitação, P, são apresentados na Tabela 1, que mostra a precipitação média anual, em torno de 613 mm, segundo Costa (2007) e o IPECE (2006), em anos de chuvas normais, correspondendo a 613 litros/m². Se toda a água que precipita nesta região não infiltrasse, nem escorresse ou evaporasse, ao final de 1 ano ter-se-ia 0,613 m de água distribuída por toda a área. Como a área da BEA é 12 km², ou seja, 12.000.000 m², que significa um volume de cerca de 7.356.000 m³, se não for computadas as perdas.

Tabela 1 Precipitação na BEA

Meses/07	Precipitação(mm)
Jan	61
Fev	249
Mar	129
Abr	174
Mai	0
Jun	0
Jul	0
Ago	0
Set	0
Out	0
Nov	0
Dez	0
Total	613

c. Evapotranspiração potencial

Na região da BEA e na maioria dos locais do semi-árido onde existe vegetação, nos horários com temperaturas elevadas, a vegetação transpira mais, conseqüentemente evapora mais e absorve mais água do solo. As árvores absorvem 125 litros/dia de água do terreno individualmente, em períodos de 12 h por dia, considerando que à noite a evapotranspiração, ET, é menor. O total de árvores na BEA com raízes profundas, como a “baraúna”, é de aproximadamente, 1.332 unidades (Cavalcante *at al.*,2006), portanto são necessários 166.500 litros/dia ou 60.772,50 m³/ano.

A percentagem de água que cada árvore perde para a atmosfera é em torno de 38% (Soares, 2006), logo em Aiuaba, a perda por evapotranspiração é de aproximadamente 23.093,55 m³/ano. Este valor, para os meses sem chuva, onde é maior a evapotranspiração, será 2.886,69 m³/mês, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 Evapotranspiração na BEA

Meses/07	Evapotranspiração(m ³ /ano)
Jan	0
Fev	0
Mar	0
Abr	0
Mai	2.886,69
Jun	2.886,69
Jul	2.886,69
Ago	2.886,69
Set	2.886,69
Out	2.886,69
Nov	2.886,69
Dez	2.886,69
Total	23.093,55

d. Absorção da umidade do solo pelas plantas

A umidade do solo absorvida pelas raízes das plantas em Aiuaba é em torno 60.772,50 m³/ano, conforme o item evapotranspiração. Este valor é causado principalmente pela absorção das raízes da vegetação, que já foram classificadas anteriormente, como árvores do tipo “Baraúna”.

e. Irrigação

A irrigação em Aiuaba é praticamente inexistente, tendo em vista que a BEA está inserida na Estação Ecológica do IBAMA, cuja área de preservação está livre da ação antrópica.

f. Escoamento Superficial

Em Aiuaba, segundo Costa (2007), a lâmina escoada, LE, é em média 1,91 mm/ano (Tabela 14). Só pode haver escoamento superficial, R, quando existe precipitação. Assim, a lâmina escoada só existe nos meses chuvosos, normalmente em períodos de 120 (cento e vinte) dias, variando de Janeiro a Maio, ou seja, em alguns anos o período das chuvas começa em Janeiro, indo até Abril, em outros, começam em Março e terminam em Maio. Estes meses são estimados, variando a cada ano, por isso não se sabe com absoluta precisão a época exata que começam ou terminam as chuvas nesta região.

Tabela 3 Lâmina Escoada (LE)/2007 na BEA

Meses	LE
Jan	0,23
Fev	0,45
Mar	0,02
Abr	1,21
Mai	0
Jun	0
Jul	0
Ago	0

Set	0
Out	0
Nov	0
Dez	0
total	1,91

Fonte: Costa (2007)

O valor da LE corresponde a 1,91 L/m²/ano. Calculando-se o valor equivalente na área da BEA que é 12.000.000 m², ter-se-á 22.920 m³/ano, ou seja, espera-se que escoe em toda a bacia, cerca de 22.920 m³ de água a cada ano.

g. Armazenamento de água no sub-solo

O armazenamento de água no sub-solo (ΔA), corresponde a parcela de água subterrânea da área estudada, encontrada nos meios poroso e fraturado que compõem o aquífero.

Considerando-se que a umidade do solo (h) é 5,59%, a porosidade média do local (n) é 44,4 % e a densidade (δ) do solo, obtida no ensaio de granulometria, $\delta = 2,74$, logo o grau de saturação (S) é dado pela Equação 04.

$$S = \frac{h\delta(1-n)}{n} \quad (04)$$

De posse destes dados, encontrou-se $S = 19,2\%$. Lembrando que este valor é para a camada de solo que está acima da rocha e que também preenche seus interfícios (fraturas). De acordo com a topografia do local, em alguns pontos, as fraturas estão acima do nível d'água e em outros, estão abaixo. No primeiro caso, o grau de saturação é o que foi calculado (19,2%) e no segundo caso, o grau de saturação é 100%.

O valor $S = 19,2\%$, é o valor equivalente a percentagem de água que pode conter os vazios do solo, ou seja, o valor máximo de: $\Delta A = 19,2\% \cdot 168 \times 10^6 \text{ m}^3 = 32.256.000 \text{ m}^3$. A água armazenada no solo está relacionada com a umidade, causada pela absorção e percolação em toda a extensão da BEA, associadas a uma profundidade média de 8,5 m. Portanto a quantidade de água armazenada na zona de aeração é: $\Delta A_1 = 12.000.000 \text{ m}^2 \cdot 8,5 \text{ m} \cdot 19,2\% = 19.584.000 \text{ m}^3$. Este valor é o máximo que o solo pode suportar de água armazenada, mas não é a realidade do local, senão, haveria deficit, já que a precipitação é menor que este estoque de água armazenada, portanto não sobraria nada para armazenar. Mas como foi mostrado anteriormente, existe água subterrânea, sendo utilizado o que previsto na literatura, que recomenda uma parcela de água armazenada como sendo 10% da precipitação, ou seja, 735.600 m³.

h. Drenagem profunda

A drenagem profunda, D, consiste no excesso de água contida no solo, ou seja, é a quantidade de água que entra, menos a água que sai. A entrada da água é feita através da infiltração e a saída é feita através de vários fatores, tais como: umidade do solo, infiltração, água retirada pelas plantas, escoamentos, etc..

A quantidade de solo acima da rocha é $0,168 \text{ km}^3$. Para conhecer-se a quantidade de solo que preenche as fraturas da rocha, considerou-se as quantidades de zonas com fraturas igual a 51 (cinquenta e uma), de acordo com os perfis do VLF, e as aberturas destas fraturas variando de 150 a 0,03 m, com valor modal em torno de 4 cm e com profundidade média de 94,5 m. Considerou-se ainda que a extensão média da bacia é 3,81 km, já que a área da BEA é de 12 Km^2 e o perímetro 15,22 Km, ajustados a um círculo (diâmetro). Logo o volume de solo que preenche as fraturas é em média 14.402 m^3 .

O solo que se encontra na zona saturada tem profundidade 5,5m, acima da rocha, sendo que seus vazios são totalmente preenchidos com água e como a porosidade (n) = 44,4%, o volume de água contido neste setor é: $14.402 \cdot 44,4\% = 6.394,5 \text{ m}^3$. Esta água faz parte do aquífero (água subterrânea), não devendo ser incorporada as extrações da precipitação. Sequenciando os parâmetros que são considerados para a drenagem profunda, tem-se as seguintes extrações:

Absorção pela plantas = $60.772,50 \text{ m}^3/\text{ano}$; Escoamento superficial = $22.920 \text{ m}^3/\text{ano}$; Água armazenada nas camadas do solo = $735.600 \text{ m}^3/\text{ano}$ e Total de extrações = $919.292,50 \text{ m}^3/\text{ano}$.

A drenagem profunda pode ser dada pela seguinte expressão:

$D = \text{Precipitação} - \text{Extrações}$; $D = 7.356.000 \text{ m}^3/\text{ano} - 919.292,50 \text{ m}^3/\text{ano}$; $D = 6.536.707,50 \text{ m}^3/\text{ano}$

Um fator relevante neste processo é que a drenagem profunda somente foi considerada nos meses mais chuvosos, sendo interpretada como a quantidade de água que passa pelo solo e também nos interstícios da rocha, indo alimentar o aquífero fraturado e que a absorção da água pelas plantas é maior que a evapotranspiração, sendo considerado no balanço hídrico, o maior valor entre os dois.

4.1.3 Modelo para o Cálculo do Balanço Hídrico

Foram utilizados dois modelos para o cálculo do Balanço Hídrico, propostos por Thornwaite (1948). O primeiro método considera todos os parâmetros, de acordo com a Equação 05 e o segundo método leva em conta apenas alguns parâmetros.

$$P + I - ET - R \pm \Delta A \pm D = 0 \quad (05)$$

Em que: P = precipitação (mm); I = irrigação (mm); ET = evapotranspiração (mm); R = escoamento superficial da água (mm); ΔA = variação da água armazenada no solo (mm) e D = drenagem profunda (mm).

O sinal mais ou menos da Equação 05 indica se os parâmetros: Armazenagem de água no solo e Drenagem profunda, são alimentados (-) ou alimentam o aquífero (+), isto é, são definidos como se o aquífero alimentasse os rios, ou se os rios alimentassem o aquífero.

O resultado, em m³/ano, do balanço hídrico é:

$$= 7.356.000,00 + 0 - 60.772,50 - 22.920 - 735.600 - 6.536.707,50 = 0 \text{ m}^3/\text{ano}.$$

Considerando que o erro é igual a zero, conforme Equação 12, os valores que entram são exatamente os que saem, o que dificilmente ocorre, pode-se então considerar a drenagem profunda como tendo um valor igual a recarga.

Na Tabela 4 são calculados os resultados do balanço hídrico pelo Método 1, mensal e o Gráfico 01 mostra os parâmetros para este balanço hídrico. Os valores da evapotranspiração já estão incluídos nos valores da absorção.

Os resultados do Balanço Hídrico equivalem à capacidade de campo do solo (CC), isto é, uma média dos valores do balanço hídrico que estão disponíveis para a vegetação. O Gráfico 02, mostra a plotagem dos resultados.

Tabela 4 Parâmetros do balanço hídrico para o ano de 2007

Meses	Precipitação (m ³ /ano)	Evapotrans (m ³ /ano)	Absorção (m ³ /ano)	R (m ³ /ano)	ΔA (m ³ /ano)	D (m ³ /ano)	Resultado (m ³ /ano)
1	732.000	0	5.064,37	2.760	61.300,00	1.634.176,87	-971.301,24
2	2.988.000	0	5.064,37	5.400	61.300,00	1.634.176,87	1.282.058,76
3	1.548.000	0	5.064,37	240	61.300,00	1.634.176,87	-152.781,24
4	2.088.000	0	5.064,37	14.520	61.300,00	1.634.176,87	372.938,76
5	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
6	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
7	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
8	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
9	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
10	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
11	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
12	0	2.886,69	5.064,37	0	61.300,00	0	-66.364,37
total	7.356.000,00	23.093,55	60.772,50	22.920,00	735.600,00	6.536.707,50	0

Gráfico 01 Balanço Hídrico em Aiuaba

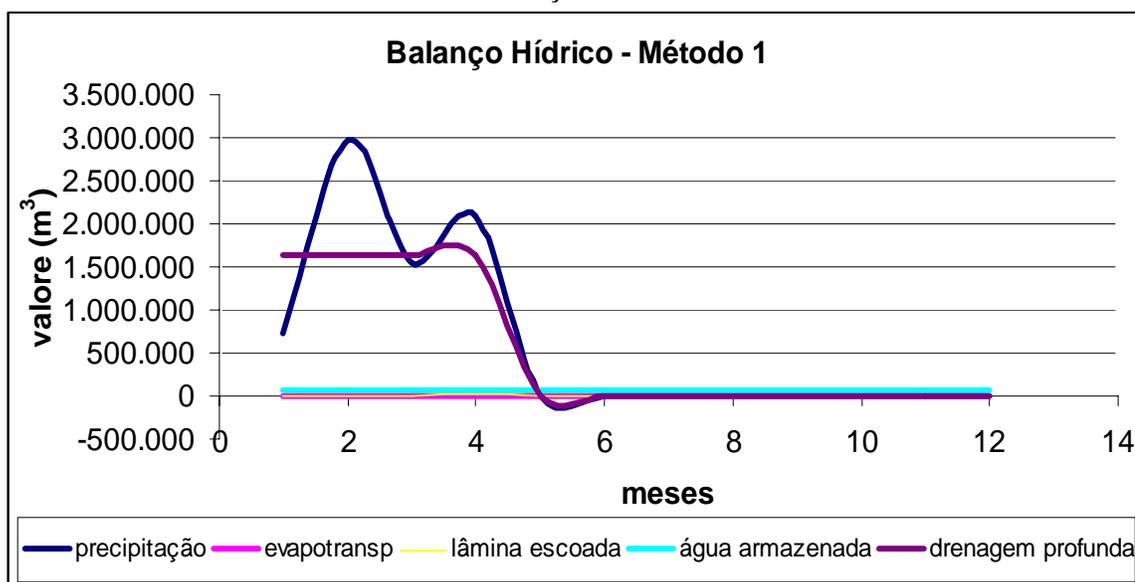


Gráfico 02 Resultados



O balanço hídrico proposto pela SUDENE para a região de Aiuaba considera os parâmetros diários, levando-se em consideração a armazenagem do solo total, ou seja, a quantidade de vazios que se pode preencher com água em períodos de chuva. Estes parâmetros incluem a capacidade de campo diária, que é de aproximadamente 48 mm.

A parcela de água subterrânea influencia significativamente o balanço hídrico. Esta influência se caracteriza através da armazenagem de água no solo e da drenagem profunda.

No parâmetro armazenamento de água no solo, a água subterrânea através da percolação e absorção faz com que a água passe pelo solo que preenche as fraturas, passe da zona de saturação, indo até a zona de aeração. Este fluxo acontece normalmente em períodos de estiagem. Em períodos chuvosos, acontece o contrário.

No parâmetro drenagem profunda, a recarga faz com que o volume de água subterrânea aumente e nos períodos de estiagem este volume diminui. A drenagem profunda tem valor equiparado à recarga, equilibrando desta maneira, o balanço.

5. CONCLUSÕES

A região de Aiuaba está incluída no Polígono das Secas, no sertão semi-árido, cuja parcela hídrica é escassa, sendo desfavorável à moradia, a criação de animais e ao plantio. Apesar destas adversidades, este estudo apontou que a região pesquisada tem uma parcela considerável de água subterrânea, que sendo gerenciada e utilizada de forma adequada, propicia uma atenuação do déficit hídrico para os habitantes da região.

A quantificação do potencial hídrico foi determinada com o balanço hídrico, realizado através do Método de Thornwaite, com todos os parâmetros e com os reduzidos, sendo verificado que o balanço pelo método tradicional, fornecem um valor equilibrado para o balanço, isto é, o parâmetro da drenagem profunda equilibra a recarga. O valor da drenagem profunda é aproximadamente $6,6 \times 10^6$ m³/ano.

Portanto a água disponível para vegetação e abastecimento público, sendo considerada as extrações, absorção da água pela plantas, escoamentos superficiais e água armazenada nas camadas do solo, totaliza 6.536.707,50 m³/ano.

Ainda no balanço hídrico, a parcela de armazenagem de água no subsolo pode ser negativa (subtraída) ou positiva (acrescida), dependendo da época do ano, ou seja, nos meses de Março, Abril e Maio será positiva, correspondente ao período de chuvas. Neste período, a parcela de água armazenada no subsolo pode abastecer o lençol freático. Nos outros meses sem chuva, esta parcela será negativa, com abastecimento dos reservatórios superficiais, pelas águas subterrâneas.

A precipitação é em torno de 613 mm/ano, a irrigação praticamente não existe, já que a área é protegida por Leis Ambientais. A evapotranspiração é maior nos meses sem chuvas, portanto de junho a fevereiro do ano seguinte.

Conclui-se, então, que existe um aquífero classificado de livre a semi-confinado com espessura de 5,5 m, ao longo da BEA. Este aquífero contém em sua parte inferior rocha e na parte superior, solo do tipo areia siltosa e em alguns locais argila, que impede e confina o movimento vertical da água. Portanto existem locais na BEA, onde o aquífero é confinado e outros onde ele é livre.

6 - REFERÊNCIAS

BAECHER, G. B., LANNEY, N. A. E EINSTEIN, H. H. (1977). **Statistical description of rock properties and sampling**, Proceeding of 18th US Symposium on Rock Mechanics, 5C1-1 to 5C1-8.

CAVALCANTE, MÁRCIO BALBINO; NASCIMENTO, SILVÂNIA MARIA DE SOUZA GOMES. **Áreas Protegidas na Caatinga: Um estudo de caso no Parque Estadual da Pedra da Boca**. Artigo apresentado a Disciplina Estudos de Impactos Ambientais (EIA), Curso de Especialização em Ciências Ambientais – FIP/PB, 2006.

CELESTINO, T. B (1986). **Determinação de propriedades e parâmetros de maciços rochosos**, In: Simpósio Sul- Americano de Mecânica de Rochas, 2, Porto Alegre, Anais... [S.I. : s.n.] 1986,v.1, p.3-43.

FRACMAN (2005).www.fracman.golder.com.Acesso em 28/09/08.

HARTLEY, L. J., HOLTON, D. E HOLCH, A. R. (2002).**NAPSAC Technical Summary Document**.

IPECE (2006). Perfil Básico Municipal Aiuaba. Fortaleza-CE, 2006, 17 pp

KULATILAKE, P. H. S. W. (1998). **Software manual for FRACNTWK** – a computer package to model discontinuity geometry in rock masses, Technical report submitted to Metropolitan Water District of outthem California.

LONG , J. C. S.. REMER, J. S., WILSON, C. R. E WITHERSPOON, P. A. (1982). **Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures**, Water Resour. Res., 18(3), 645-658.

LONG, ET.ALL. 1982. **Water Resources research**, Vol 18, n°. 3. Pages645 – 658.

LOBO FERREIRA, J.P. (1981) - "**Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with scarce (lack) hydrogeological data**". Proceedings of

SANTIAGO, M.F.; SILVA, C.M.S.; MENDES FILHO, J.; Frischkorn, H. . **Characterization of groundwater in the Cariri (Ceará/Brazil) by environmental isotopes and electric conductivity**. Radiocarbon, v. 39, p. 49-60, 1997.

TELLES, I. A., ET AL. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, telles

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical Review, New York, v. 38, n. 1, p. 55- 94, 1948.