

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CAPTAÇÃO D' ÁGUA NA LAGOA DO BONFIM, RN - BRASIL

Roberto Pereira¹
João Abner Guimarães Junior²
Gerson Cardoso da Silva Junior³
Arthur Mattos⁴

Resumo

O presente estudo compreende o desenvolvimento de um modelo computacional de balanço hídrico para simular o comportamento de um lago submetido a diferentes vazões de captação d'água, possibilitando a avaliação dos impactos efetivos associados ao processo de esvaziamento do reservatório. A metodologia desenvolvida foi aplicada à questão da avaliação dos impactos provocados pelo sistema adutor Trairi, na lagoa do Bonfim, maior reservatório do estado do Rio Grande do Norte. O modelo computacional foi desenvolvido em duas etapas: 1) determinação dos saldos de fluxo, o qual engloba os fluxos subterrâneos de entrada e saída da lagoa e outros consumos antrópicos (exceto o bombeamento da adutora) de difícil determinação direta, simplificando a abordagem do problema; 2) cálculo dos rebaixamento na lagoa associados com um determinado regime de vazões bombeadas. Os resultados mostraram que o volume captado para a adutora foi responsável por 48% do rebaixamento do nível d'água na lagoa do Bonfim no período de bombeamento, que foi de 1,17 m. O impacto seria muito maior se a vazão utilizada fosse, neste período, a prevista para o final do plano, o que implicaria num rebaixamento de 1,913 m, correspondendo a aumento de 71,3% em relação ao rebaixamento observado.

Palavras-chave: Lago, Impacto ambiental

¹ CEFET-RN, Fone (0xx84) 215.2636, Fax (0xx184) 221.4005, E-mail: bobdudu@digi.com.br, Natal – RN, Brasil.

² UFRN/LARHISA/CT, Fone (0xx84) 215.3775, Fax (0xx84) 215.3703, E-mail: abner@ct.ufrn.br, Natal-RN, Brasil.

³ I. GEOCIÊNCIAS-UFRJ, I. do Fundão – Rio de Janeiro, CEP: 21.949-900. Fone/Fax: (0xx21) 590.8091, E-mail: Gerson@acd.ufrj.br, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

⁴ UFRN/LARHISA/CT, Fone (0xx84) 215.3775, Fax (0xx84) 215.3703, E-mail: armattos@ct.ufrn.br, Natal-RN, Brasil.

INTRODUÇÃO

O presente estudo compreende o desenvolvimento de um modelo computacional de balanço hídrico para simular o comportamento de um lago submetido a diferentes vazões de captação d'água, possibilitando a avaliação dos impactos efetivos associado ao processo de esvaziamento do reservatório, o qual pode ser expresso pela redução do nível da superfície do espelho d' água.

A metodologia desenvolvida foi aplicada à questão da avaliação dos impactos provocados pelo sistema adutor Trairi, denominado de adutora Monsenhor Exedito, na lagoa do Bonfim, ponto de captação do sistema, o qual entrou em funcionamento em 01/08/98. O intervalo de estudo selecionado compreendeu os meses de novembro de 1998 até julho de 1999, justamente quando se implantou, neste trabalho, um monitoramento mais efetivo nesta lagoa, com a instalação de uma estação climatológica. Além disso, neste período a lagoa do Bonfim sofreu um rebaixamento expressivo e acelerado, indicando um quadro de possível comprometimento da disponibilidade hídrica local e das condições ambientais da área. Procurou-se, então, avaliar a parcela decorrente da captação da adutora e aquela gerada pelo déficit

hídrico que a região atravessou no período.

A lagoa do Bonfim, com uma área do espelho d'água de 9 km² e uma capacidade de acumulação de 83 milhões de m³, é o maior reservatório da região litorânea oriental do estado do Rio Grande do Norte. Esta região possui as seguintes características hidrometeorológicas: clima tropical úmido (As' na escala Köpper), pluviometria média igual a 1.273 mm (SUDENE, 1990), com máximos valores ocorrendo principalmente nos meses de março a julho, e hidrografia pobre formada por rios perenes de pequeno porte.

A lagoa do Bonfim integra um sistema lacustre formado por seis lagoas (Figura 01), sendo as outras cinco (Redonda, Urubu, Boa Água, Ferreira Grande e Carcará) menores, conectado pelo aquífero livre que é composto por rochas terciárias areno-argilosas da Formação Barreiras, associadas com uma cobertura arenosa eólica, do Quaternário (Pereira *et alii*, 1996). Informações potenciométricas (Pereira *et alii*, op. cit. e outros trabalhos subseqüentes) mostram que o setor oeste representa a principal zona de recarga da lagoa do Bonfim, sendo que esta repassa subterraneamente, e de forma divergente, em direção ao rio

Pium (a norte), riacho Boacica (sudeste) e rio Trairi (a sul).

A adutora Monsenhor Expedito, com 315 Km de extensão, abastece 20 municípios das regiões Trairi e Potengi do estado do Rio Grande do Norte. A primeira etapa do projeto encontra-se

em funcionamento, com uma vazão de cerca de 240 L/s. No final do plano, no horizonte de projeto no ano 2016, a vazão deverá ser elevada para 430 L/s beneficiando uma população de 222.336 habitantes

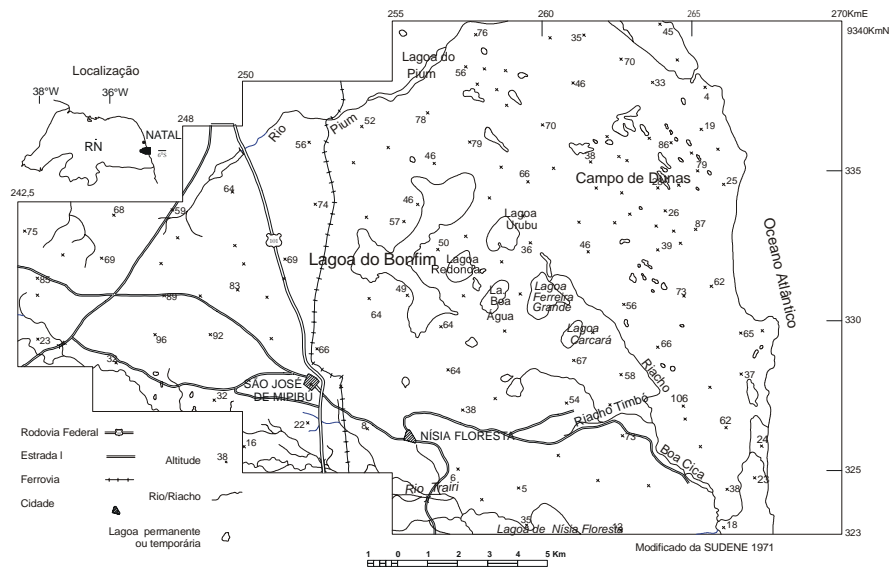


Figura 01 – Localização do sistema lacustre Bonfim.

BALANÇO HÍDRICO DE LAGOS

O balanço hídrico é um modelo conceitual de avaliação quantitativa dos recursos hídricos de uma região, relacionando os processos intervenientes no ciclo hidrológico.

Analicamente, o balanço hídrico é expresso pela equação (1) diferencial geral da continuidade (Villega & Mattos, 1975), baseada no princípio da conservação da massa de um sistema aplicado a um volume de controle, relacionando a taxa de variação do

armazenamento interno com o saldo de fluxo externo no volume de controle.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

Onde: *I* (*input*) e *O* (*output*) são os totais de fluxos que entram e saem no volume de controle e *ds/dt* é a taxa de variação do armazenamento interno no volume de controle.

Na equação (2) geral do balanço hídrico de um lago fechado (UNESCO, 1981), como é o caso da lagoa do Bonfim, os fluxos de entrada (*I*) compreendem (Figura 02): o

escoamento superficial (Q_{escoa}), a recarga subterrânea do aquífero ($Q_{recarga}$) e as precipitações pluviais (P) sobre a área do espelho d'água (A). Os fluxos de saída (O) são constituídos pela perda d'água por evaporação no espelho, determinada pelo produto da taxa de evaporação (E) pela área do

espelho d' água (A); as perdas subterrâneas do Lago (Q_{perdas}) e os consumo d'água ($Q_{consumos}$). A taxa de variação do armazenamento (ds/dt), em cada instante, pode ser avaliada pelo produto da área do espelho d'água (A) pela taxa de variação do nível d'água do lago (dh/dt).

$$(P.A + Q_{sup} + Q_{recarga})_{entrada} - (E.A + Q_{perdas} + Q_{consumos})_{saídas} = A \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

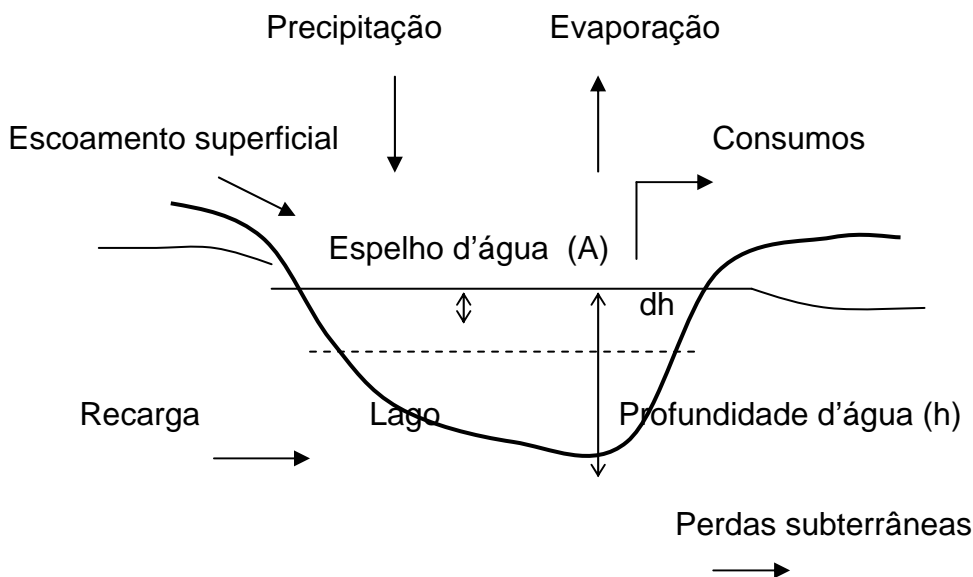


Figura 2 - Volume de controle do balanço hídrico de um lago fechado.

A área do espelho (A) pode ser expressa como função da profundidade (h), conforme a equação (3).

$$A = k.h^\alpha \quad (3)$$

Onde: A é a área do espelho d'água do reservatório, em m^2 ; h (em m) é a lâmina d'água, mas na simulação foi substituído pela altitude do nível do lagoa, como efeito prático, e k e α são os

coeficientes da função de regressão cota-área.

Para as condições da lagoa do Bonfim, o escoamento superficial direto pode ser desprezado, devido a não existência de uma rede de drenagem superficial direcionada para esta lagoa e o consumo d'água é expresso pela vazão bombeada pela adutora (Q_{bomba}) e

outros usos relevantes (Q_{outros}), tais como a irrigação. Portanto, a equação (4) do balanço hídrico da lagoa do

$$(P.A + Q_{recarga})_{entrada} - (E.A + Q_{perdas} + Q_{bomba} + Q_{outros})_{saída} = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

MODELO DE SIMULAÇÃO

Foi desenvolvido um modelo computacional de balanço hídrico mensal para simular o comportamento da lagoa do Bonfim durante o período observado de exploração, novembro/98 até julho/99, conforme inicialmente justificado.

O modelo teve como base os saldos de fluxos do balanço hídrico (termo residual) considerados como independentes do bombeamento, os quais foram determinados, inicialmente, a partir dos dados observados.

Para isto, contou-se com informações diárias de variação do nível d'água da lagoa, e, principalmente, com os dados de uma estação hidrometeorológica instalada às margens da referida lagoa, apresentando registros diários de precipitações pluviais, evaporação, velocidade e direção do vento, umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica.

Estimativa do saldo de fluxo

Os componentes do saldo de fluxo do balanço hídrico, definidos no contexto do estudo, constituem as

Bonfim pode ser apresentada da seguinte forma:

recargas e as perdas subterrâneas da lagoa e os outros consumos antrópicos, os quais são apresentados na expressão (5). Sacks *et al.* (1992) e Sacks *et al.* (1998) consideraram, na aplicação de balanço hídrico de lagos, o termo residual como a diferença entre as entradas e saídas de águas subterrâneas para avaliar as trocas de águas subterrâneas com os lagos, na Flórida. É importante reconhecer que termos desconhecidos do balanço hídrico obtidos a partir de uma ou mais variáveis medidas, acumulam os erros destas.

$$Q_{saldo} = Q_{recarga} - (Q_{perda} + Q_{outros}) \quad (5)$$

Combinado-se as equações (4) e (5), tem-se:

$$Q_{saldo} = A \cdot \frac{dh}{dt} - p.A + (E.A + Q_{bomba}) \quad (6)$$

Discretizando-se a equação diferencial (6) pelo método das diferenças finitas, segundo um esquema progressivo no tempo, para uma área da superfície do espelho d'água média (\bar{A}), no intervalo de tempo (Δt) mensal, chega-se a seguinte expressão:

$$Q'_{saldo} = \bar{A}(h^{t+1} - h^t - P^t + E^t) + Q'_{bomba} \quad (7)$$

Onde: Q'_{saldo} e Q'_{bomba} são as vazões no mês atual (t), em m³/mês; h^t e h^{t+1} são as profundidades d'água no início do mês atual e subsequente, respectivamente, em m; P^t e E^t são, respectivamente, a precipitação pluvial e a evaporação no decorrer do mês atual, em m/mês. \bar{A} é a área média mensal do espelho d'água, em m², calculada a partir das áreas do espelho no início do mês atual e do mês subsequente.

$$\bar{A} = \frac{A^{t+1} + A^t}{2} \quad (8)$$

Simulação da lagoa do Bonfim

O modelo de simulação determina as profundidades d'água na lagoa, no início de cada mês do período observado, a partir dos saldos de fluxo avaliados numa primeira etapa.

Substituindo-se na equação 6 a área A dada pela função (3) e desenvolvendo-se, chega-se a seguinte equação diferencial ordinária com relação à profundidade h .

$$\frac{dh}{dt} = P - E + \frac{Q_{saldo} - Q_{bomba}}{kh^\alpha} \quad (9)$$

Onde a derivada é uma função direta da profundidade d'água.

$$\frac{dh}{dt} = f(h) \quad (10)$$

Sendo:

$$f(h) = P - E + \frac{Q_{saldo} - Q_{bomba}}{kh^\alpha} \quad (11)$$

Onde: h é a profundidade d'água, em m; P e E são, respectivamente, a precipitação pluviométrica e a evaporação, em m/mês; Q_{saldo} e Q_{bomba} são, respectivamente, o saldo de fluxo e a vazão bombeada, em m³/mês e k e α são os coeficientes da função de regressão cota-área.

Resolvendo-se, passo a passo, a equação diferencial com o auxílio do método de Runge-Kutta de 4^a ordem (Ruggiero & Lopes, 1988), para um intervalo de tempo " Δt " mensal, chega-se:

$$h^{t+1} = h^t + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (12)$$

Sendo :

$$\begin{aligned} k_1 &= f(h^t) \\ k_2 &= f\left(h^t + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 &= f\left(h^t + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 &= f(h^t + k_3) \end{aligned} \quad (13)$$

Onde: h^t e h^{t+1} são, respectivamente, as profundidades d'água, no início do mês atual e subsequente, em m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da metodologia proposta aplicada a lagoa do Bonfim, envolvendo todos os componentes do balanço hídricos, estão apresentados em quadros a seguir. Os saldos de fluxo do balanço hídrico mensal da lagoa, para as condições reais, foram determinados

com o auxílio do Quadro 1 e o Quadro 2 mostra os rebaixamentos mensais da lagoa do Bonfim sem o efeito do bombeamento do sistema adutor.

Ainda, para avaliar a sustentabilidade hídrica da lagoa frente as demandas futuras da adutora, o modelo de simulação foi aplicado, no mesmo período estudado, para a vazão máxima de projeto no final do plano de 430 L/s ou 1.114.560 m³/mês. O Quadro 3 mostra os resultados desta simulação.

Quadro 1 – Saldo de Fluxo do balanço hídrico da lagoa do Bonfim.

Data T	Prof. h_t (m)	Volume V_t (m ³)	Área A_t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E_t mm/mês	$0,75 \times E_t$ mm/mês	Vazão bombeada (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6	409.595	120.079	529.674
01/12/98	41,565	72.842.258	8.052.952	19,8	231,9	173,9	450.808	457.032	907.840
01/01/99	41,306	70.707.738	7.865.269	5,7	214,5	160,9	372.949	297.247	670.196
01/02/99	41,073	68.829.952	7.699.189	97,4	199,1	149,3	431.938	100.803	532.741
01/03/99	40,955	67.899.576	7.616.555	42,8	207,1	155,3	326.238	32.547	358.785
01/04/99	40,800	66.689.434	7.508.722	138,6	201,2	150,9	693.617	416.892	276.725
01/05/99	40,753	66.320.554	7.475.771	234,9	149,3	112,0	568.949	241.528	327.421
01/06/99	40,829	66.915.352	7.528.883	102,3	160,6	120,5	539.737	168.004	371.733
01/07/99	40,764	66.407.381	7.483.531	43,5	189,8	142,4	666.131	137.320	528.811
01/08/99	40,599	65.144.417	7.370.457						
Diferença	1,170	9.407.440	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	4.459.962	43.964	4.503.926

Quadro 2 – Simulação operacional da lagoa do Bonfim sem bombeamento.

Data t	Prof. h _t (m)	Volume V _t (m ³)	Área A _t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E _t mm/mês	0,75xE _t mm/mês	Vazão bombeada (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6		120.079	120.079
01/12/98	41,614	73.249.263	8.088.608	19,8	231,9	173,9		457.032	457.032
01/01/99	41,410	71.557.037	7.940.084	5,7	214,5	160,9		297.247	297.247
01/02/99	41,223	70.038.095	7.806.149	97,4	199,1	149,3		100.803	100.803
01/03/99	41,161	69.533.117	7.761.489	42,8	207,1	155,3		32.547	32.547
01/04/99	41,048	68.631.325	7.681.567	138,6	201,2	150,9		- 416.892	- 416.892
01/05/99	41,088	68.953.558	7.710.150	234,9	149,3	112,0		- 241.528	- 241.528
01/06/99	41,237	70.149.353	7.815.980	102,3	160,6	120,5		- 168.004	- 168.004
01/07/99	41,240	70.175.476	7.818.287	43,5	189,8	142,4		- 137.320	- 137.320
01/08/99	41,162	69.542.727	7.762.339						
Diferença	0,607	5.009.130	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	-	43.964	43.964

Quadro 3 – Simulação operacional da lagoa do Bonfim para a vazão de final do plano.

Data t	Prof. h _t (m)	Volume V _t (m ³)	Área A _t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E _t mm/mês	0,75xE _t mm/mês	CAERN (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6	1.114.560	120.079	1.234.639
01/12/98	41,481	72.141.756	7.991.486	19,8	231,9	173,9	1.114.560	457.032	1.571.592
01/01/99	41,139	69.357.416	7.745.934	5,7	214,5	160,9	1.114.560	297.247	1.411.807
01/02/99	40,809	66.761.556	7.515.160	97,4	199,1	149,3	1.114.560	100.803	1.215.363
01/03/99	40,601	65.159.689	7.371.827	42,8	207,1	155,3	1.114.560	32.547	1.147.107
01/04/99	40,340	63.192.669	7.194.817	138,6	201,2	150,9	1.114.560	(416.892)	697.668
01/05/99	40,234	62.406.941	7.123.793	234,9	149,3	112,0	1.114.560	(241.528)	873.032
01/06/99	40,234	62.409.616	7.124.035	102,3	160,6	120,5	1.114.560	(168.004)	946.556
01/07/99	40,087	61.334.644	7.026.565	43,5	189,8	142,4	1.114.560	(137.320)	977.240
01/08/99	39,856	59.670.325	6.874.956						
Diferença	1,913	14.881.531	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	10.031.040	43.964	10.075.004

Os coeficientes das funções de regressão cota-área e cota-volume, apresentados em seguida, formam determinada a partir dos dados do levantamento batimétrico realizado pela COSTA (1997).

Coeficientes da função de regressão

$$\text{cota-área: } A = k_1 \cdot h^\alpha$$

$$k_1 = 6,466720$$

$$\alpha = 3,765459$$

$$\text{Coeficiente de correlação} = 0,988580$$

Coefficientes da função de regressão**cota-volume:** $V = k_2 \cdot h^\beta$

$$K_2 = 1,496567$$

$$\beta = 4,748954$$

Coeficiente de correlação =
0,998692

O Quadro 4, seguinte, apresenta uma síntese comparativa dos resultados encontrados nas diversas condições de bombeamento estudadas para a lagoa do Bonfim.

A fragilidade da lagoa do Bonfim, frente à exploração do período

analisado, pode também ser constatada considerando que o volume positivo resultante do somatório do saldo de fluxo, em torno de + 43.964 m³ (Quadro 1), o qual corresponde apenas ao fluxo subterrâneo de entrada que fica disponível no lago, é bastante pequeno em relação ao volume bombeado pela adutora que foi de 4.459.962 m³, lembrando que para a vazão de final de plano, o volume a ser explotado, seria em torno de 10.031.040 m³ (Quadro 3).

Quadro 4 – Síntese das condições de bombeamento na lagoa do Bonfim.

Condição de bombeamento	Volume da Lagoa no final do período		Desnível m	Variação de volume m ³	Volume bombeado	
	m ³	% ¹			m ³	% ²
Sem	69.542.727	93,3	0,607	5.009.130	0	0
Real	65.144.417	87,4	1,170	9.407.440	4.459.962	47,4
Final do plano	59.670.325	80,0	1,913	14.481.531	10.031.040	69,3

¹ % relativa ao volume da lagoa no início do bombeamento (74.551.857 m³)

² % relativa a variação de volume da lagoa no período.

CONCLUSÕES

O modelo simplificou a abordagem do problema englobando no saldo de fluxo os componentes do balanço hídrico de difícil determinação direta, tais como os fluxos subterrâneos de entrada e saída da lagoa do Bonfim e outros consumos. Entretanto, para a aplicação desta metodologia requer dados mínimos de monitoramento da pluviometria, evaporação e nível d'água.

O volume captado para a Adutora foi responsável por 48% do rebaixamento do nível d'água na lagoa do Bonfim no período de bombeamento, que foi de 1,17 m, mostrando, portanto, que a captação é um fator muito impactante no sistema lacustre.

O impacto devido ao bombeamento seria muito maior se a vazão utilizada fosse, neste período, a prevista para o final do plano, o que

implicaria num rebaixamento de 1,913 m, correspondendo a aumento de 71,3% em relação ao rebaixamento observado.

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (CEFET), a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Agradecimentos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA - Consultoria e Serviços Técnicos e Ambientais Ltda/SERHID - 1997. Estudos da Disponibilidade Hídrica da Lagoa do Bonfim.
- PEREIRA, R.; CHIAVENATO, M. C.; FREITAS, J.; REIS, L. M. M. 1996. Carta Geotécnica do Município de Nísia Floresta - Rn. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 2, São Carlos, 1996. Boletim..., ABGE, p.233-239.
- RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. 1988. *Cálculo Numérico. Aspectos Teóricos e Computacionais*. São Paulo, McGraw-Hill.
- SACKS, L. A.; LEE, T. M.; TIHANSKY, A. B. 1992. Hydrogeologic and preliminary data analysis for the hydrologic-Budget assessment of lake Barco, an acidic seepage lake in the Putnam County, Florida. *Water-Resources Investigations*, **91**-4180.
- SACKS, L. A.; SWANCAR, A.; LEE, T. M. 1998. Estimating ground-water exchange with lakes using water-budget and chemical mass-balance approaches for ten lakes in ridge areas of Polk and Highlands Counties, Florida. *Water-Resources Investigations*, **98**-4133.
- SUDENE 1990. *Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste*. Recife (Série Pluviométrica , **4**).
- UNESCO 1981. *Methods of Computation of the Water Balance of Large Lakes and Reservoirs*. Fontenoy, Paris. 122 p.
- VILLELA, S.M.; MATTOS, A. 1975. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 245 p.