

Exploração Sustentada do Aquífero Dunas / Barreiras na Cidade de Natal, RN

Antonio Marozzi Righetto e Mariano Alves da Rocha

righetto@ct.ufrn.br

Recebido: 30/06/04 revisado: 16/12/04 aceito: 03/05/05

RESUMO

O abastecimento de água da cidade de Natal é realizado preponderantemente através da exploração intensiva das águas subterrâneas do aquífero Dunas / Barreiras, dentro do perímetro urbano. Em decorrência da grande expansão da cidade e da pequena área de recarga do aquífero, estudos aprimorados sobre o balanço hídrico e sobre a vulnerabilidade do aquífero são fundamentais para direcionar o desenvolvimento com sustentabilidade. Este estudo trata da avaliação do balanço hídrico, incluindo a recarga natural, a exploração dos recursos hídricos, as fugas pelas fronteiras e o retorno das águas servidas. É aplicado um modelo de exploração sustentada em que se busca especificar a exploração ótima em função das características do aquífero e da recarga. A questão da contaminação por nitrato por águas servidas também é abordada. Os resultados obtidos mostram a necessidade de se garantir os atuais níveis de recarga e a reutilização da água servida a fim de garantir a sustentabilidade da exploração atual das águas subterrâneas. Outra alternativa técnica e ambientalmente mais adequada seria promover de forma crescente o aporte de água para abastecimento de regiões vizinhas à cidade de Natal, reduzindo-se a exploração a níveis que permitam dispensar o reuso das águas servidas.

Palavras-chave: aquífero, balanço hídrico, exploração sustentada.

INTRODUÇÃO

A importância da água para a manutenção da vida no nosso planeta é um conceito público universal. Para seu fim mais nobre, exige-se que este líquido tenha qualidades adequadas à sua utilização, como também que a sua exploração seja regida por fatores técnicos bem definidos com o intuito de preservar a integridade dos mananciais, dentro de padrões adequados ao consumo atual e futuro. Um dos maiores desafios que se enfrentará será a preservação efetiva do meio ambiente associada à exploração racional e otimizada dos recursos hídricos.

A cidade de Natal, que já foi conhecida como a Capital de Estado abastecida com a melhor água do Brasil, se depara hoje com grave problema de contaminação do aquífero por nitrato, decorrente das infiltrações no solo de águas servidas das fossas e sumidouros, pois, cerca de 70% do esgoto doméstico produzido são lançados no subsolo. A inexistência de sistema de esgotamento sanitário e de tratamento que possibilite a disposição final adequada dos esgotos domésticos comprometeu o manancial da cidade.

As águas que abastecem Natal, provenientes de poços tubulares em sua maioria apresentam elevados índices de contaminação por nitrato. Segundo a CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio

Grande do Norte), vários poços que ultrapassaram o limite de tolerância aceito para o nitrato (45 mg/L.NO₃) foram fechados; outros, ainda se encontram em operação graças à diluição proposital efetuada pela concessionária através da mistura de águas provenientes de outros mananciais.

Outro aspecto tão relevante quanto à contaminação é a maneira como o manancial subterrâneo está sendo explorado. Tendo em vista que a Formação Barreiras estende-se por toda a costa do Estado do Rio Grande do Norte, parece não haver grandes preocupações por parte das entidades e profissionais que exploram industrialmente o aquífero, pois, se entende erroneamente que, por sua grande extensão, a recarga natural garante a exploração intensiva, sem preocupações futuras.

No entanto, dados hidrogeológicos indicam isolamento da área de exploração do aquífero com relação à recarga natural, uma vez que esta área está delimitada por fronteiras que isolam o domínio subterrâneo, quais sejam: os rios Potengi e Pitimbu e a costa oceânica na horizontal e formação calcífera na fronteira de profundidade, na base. Pelo mapa potenciométrico existente (Figura 1), verifica-se que não se pode esperar aporte natural significativo de água do aquífero Dunas / Barreira de regiões fora da área de exploração.

Essa questão de delimitação de área de recarga associada à crescente exploração de água do aquífero, decorrente do grande desenvolvimento urbano de Natal que, por sua vez, leva à crescente impermeabilização do solo, motivou a elaboração do presente trabalho.

Há necessidade premente de se avaliar com confiabilidade a disponibilidade hídrica desse aquífero, considerando os atuais níveis de exploração e a recarga, natural e induzida pelo retorno das águas servidas. Este estudo trata da utilização sustentada do aquífero Dunas / Barreiras, enfocando as condições da exploração e recarga.

AREA DE ESTUDO

A área de estudo, referente à região sul da cidade de Natal, está delimitada pelos rios Potengi, Pitimbu e pelo mar. Ocupa uma área de aproximadamente 90 Km², abrangendo a maior parte do setor urbanizado de Natal. A vegetação é rala e as atividades antrópicas são típicas de uma cidade em crescimento acelerado, com repercussões significativas na impermeabilização do solo, aumento da exploração de águas subterrâneas e superficiais e intensificação de contaminação causada pela percolação de esgotos através de fossas e sumidouros.

O rio Potengi que limita a área nos setores norte e oeste, tem origem nos terrenos cristalinos do semi-árido do Estado do Rio Grande do Norte, perenizado somente na zona costeira devido à ressurgência das águas subterrâneas do aquífero Dunas / Barreiras. Três pequenos afluentes captam água de drenagem proveniente de áreas impermeabilizadas da região mais antiga da cidade. Entretanto, são inexpressíveis como sumidouros de água do aquífero.

O rio Pitimbu, de menor porte, é perene e limita a área de estudo no setor sul. A vazão de base é decorrente de águas de ressurgência da Formação Barreiras. Em seu leito médio tem-se a Lagoa do Jiqui que contribui como manancial superficial para suprir parte da demanda de água da cidade de Natal.

A coluna estratigráfica da região de Natal é composta por rochas sedimentares dos períodos Cretáceo, Terciário e Quaternário, depositadas sobre um embasamento cristalino do Pré-Cambriano. As unidades geológicas principais são: embasamento Cristalino; sedimentos cretáceos, formados por rochas carbonáticas, constituídas por calcários e arenitos calcíferos e que ocorrem em toda área em estudo; sedimentos Terciário-Quaternários, formadores da unidade geológica conhecida como Formação Bar-

reiras. Neste grupo, destacam-se: a formação Guararapes, composta por sedimentos arenosos e argilosos; a formação Macaíba, formada por sedimentos areno-argilosos; e os Sedimentos Quaternários, que são os depósitos recentes, compostos por dunas, aluviões e mangues.

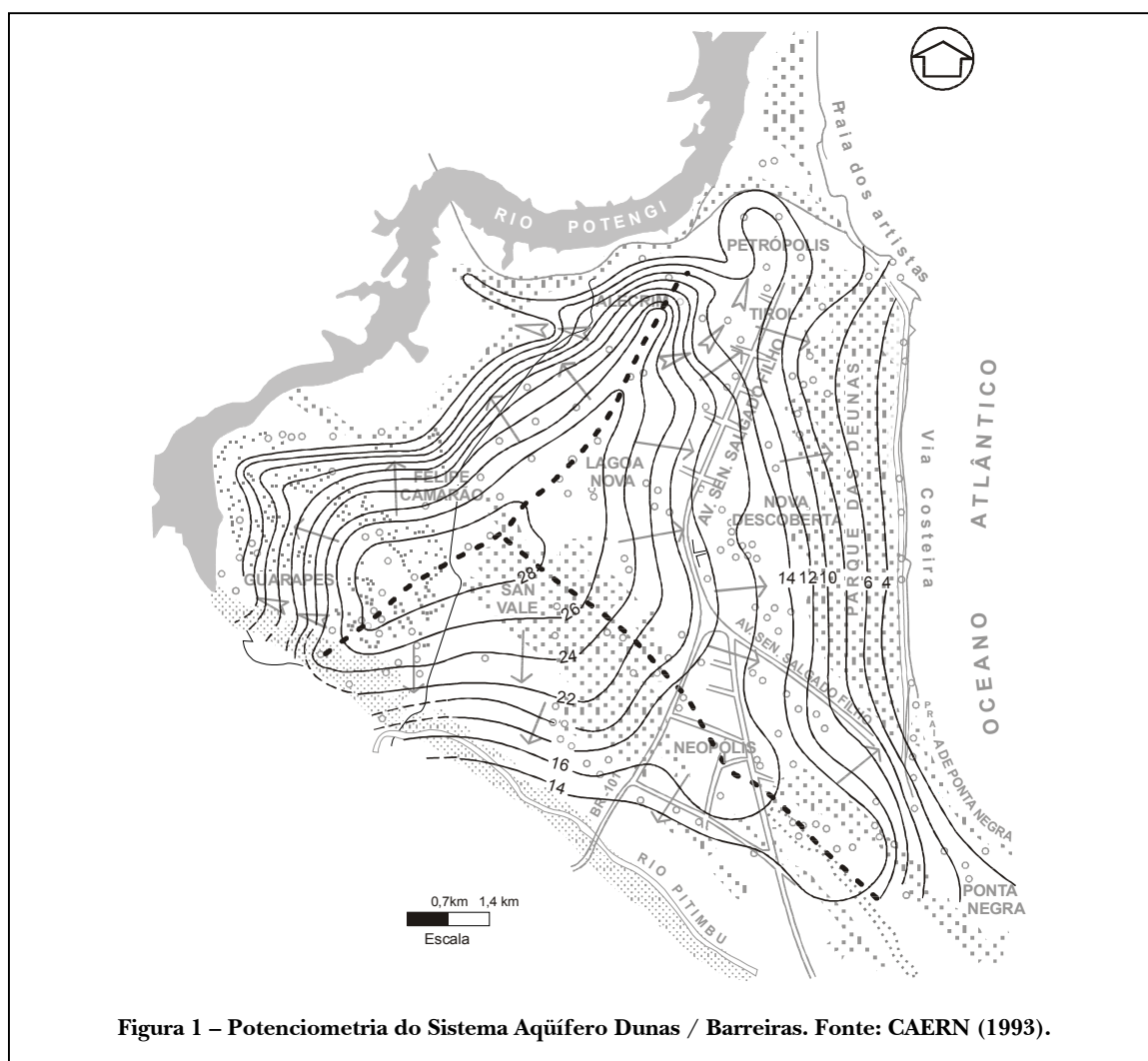
Na área de estudo, o Barreiras está representado pela Formação Guararapes e por pequenas exposições da Formação Macaíba. Através dos perfis estratigráficos dos poços perfurados, verifica-se que a espessura da Formação Barreiras varia de 60m a 116m. Até, aproximadamente, 30m, é formada por arenitos argilosos, argilas arenosas, siltitos, argilas e intercalações de arenitos de grãos finos e médios. Na parte inferior dos perfis, encontram-se predominantemente arenitos de granulometria fina e grossa, com intercalações de argilas. Estes depósitos estão sotopostos a depósitos mais recentes de dunas, aluviões e mangues (Melo, 1995).

A precipitação pluvial anual na área de Natal tem valor máximo de 2462mm e mínimo de 640mm, com média de 1550mm (período 1910 - 2000). As temperaturas médias mensais anuais observadas variaram de 25°C a 28°C, com média anual de 26,2°C e amplitude térmica de 2,9 °C. A insolação mensal é elevada, com valor mínimo de 195 horas (julho) e valor máximo de 296 horas (fevereiro). A média anual é de 2960 horas. A taxa de evaporação potencial mensal varia entre 100 mm (julho) e 180 mm (fevereiro) com total anual de 1700 mm.

A disponibilidade de água no solo pode ser estimada por balanço hídrico. O período de chuvas inicia-se em janeiro, de forma que a água pluvial começa a penetrar no solo por infiltração chegando a um excedente de 532mm no mês de agosto. De agosto em diante, o solo começa a perder água até atingir déficit no final do ano de 393mm. O déficit hídrico anual é estimado em 530mm para uma camada superficial de solo de 100 mm.

O sistema hídrico subterrâneo de Natal é formado pelos aquíferos Dunas e Barreiras, aqui denominado Dunas / Barreiras. Ocupa uma área de 114 km² (zona norte com 24 km² e zona Sul com 90 km², em relação ao rio Potengi) e como sistema de recursos hídricos, contém poços de captação, lagoas, fontes e cursos d'água de superfície, sendo expressivos como sumidouros somente os cursos d'água de contorno e os poços de bombeamento. De acordo com o relatório da CAERN (Melo, 1995), o aquífero tem forte conexão hidráulica com a superfície.

Os estudos hidrogeológicos realizados na área de Natal indicam a existência de duas unidades aquíferas subterrâneas, sendo uma superior com características de aquífero livre formada por sedi-



mentos dunares com baixo potencial hidrogeológico e outra inferior, do tipo semi-confinado, formada por arenitos inferiores da Formação Barreiras (Melo, 1995). Essas unidades são separadas por uma camada areno-argilosa que corresponde aos sedimentos superiores do Barreiras. Ensaio realizado em superfície indicam que a condutividade hidráulica varia de $1,5 \times 10^{-4}$ m/s a $2,8 \times 10^{-4}$ m/s com média de $2,2 \times 10^{-4}$ m/s, caracterizando certa homogeneidade das dunas. A porosidade efetiva foi calculada obtendo-se valor médio em torno de 10 % (Melo, 1995).

Pela análise das variações das cargas hidráulicas nos poços, como também as feições litológicas e estruturais dos sedimentos, há indicação que as formações dunares e os sedimentos da Formação Barreiras formam um sistema hidráulico único, (Melo, 1995). As cargas hidráulicas dos poços rasos e pro-

fundos se ajustam a uma mesma superfície potenciométrica, com exceção de poucos setores a sudeste da área, onde existem estruturas geológicas que propiciam a formação de aquíferos suspensos (Melo, 1995).

É consenso que o sistema Dunas / Barreiras se comporta em geral como um sistema do tipo livre. Verifica-se que o seu nível potenciométrico flutua com as variações sazonais, ou seja, suas potencialidades estão condicionadas à infiltração direta das precipitações sobre as dunas, cujo volume efetivamente infiltrado repõe os volumes líquidos (água bombeada menos água servida de retorno) de água subterrânea que são retirados pela exploração dos poços e dos fluxos de água subterrânea. Dados da CAERN (2000) mostram que a exploração anual de água subterrânea (zona sul de Natal) é da ordem de

$56,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ /ano, com aumento anual estimado de $1,16 \times 10^6 \text{ m}^3$ / ano.

A Figura 1 mostra o mapa potenciométrico do sistema Dunas / Barreiras, indicando o sentido do movimento das águas subterrâneas. Observa-se que existem três frentes principais de escoamento, a saber: Frente Costeira com gradiente de 0,66 %; Frente Potengi com gradiente de 1,20 %; Frente Pitimbu com gradiente de 0,66 %. Esses gradientes se referem às inclinações da superfície potenciométrica em regiões próximas aos contornos.

BALANÇO HÍDRICO

O volume anual (ano 2000) explotado através de poços pela CAERN é estimado em $56 \times 10^6 \text{ m}^3$. Neste estudo, incluiu-se o volume explotado por poços de particulares, avaliado em $6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Assim, o volume anual explotado é estimado em $V_E = 62 \times 10^6 \text{ m}^3$.

O volume anual médio precipitado sobre a área é calculado por: $V_p = A \cdot P = 90 \times 10^6 \times 1550 \times 10^{-3} = 140 \times 10^6 \text{ m}^3$, sendo a área de recarga igual a $A = 90 \times 10^6 \text{ m}^2$ e a precipitação média anual igual a $P = 1550 \text{ mm}$.

O volume de água servida que retorna ao aquífero, V_R , foi estimado com base no volume explotado do aquífero pela CAERN e no volume retirado de manancial superficial, estimado em 30 % (rio Pitimbu) do volume explotado através de poços pela CAERN na zona sul de Natal. Além disso, como parte da região tem esgotamento sanitário, estimada em 40%, admitiu-se que 60% do volume total anual da água servida é percolada ao aquífero Dunas / Barreiras. Assim, chamando de V_R o volume anual de água servida que retorna ao aquífero, tem-se a seguinte estimativa:

$$V_R = (1,3 \times 56 \times 10^6 + 6 \times 10^6) \times 0,60 = 47 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Através de informações colhidas junto a CAERN e dos estudos da ACQUAPLAN (1988) e de Melo (1995), o presente estudo considerou uma flutuação anual do nível potenciométrico do aquífero, Δh , em torno de 5,0 m e valor da porosidade efetiva do aquífero n_{ef} ao redor de 0,10. Assim, estima-se que o deplecionamento médio do volume armazenado pelo aquífero dentro de cada ano, ΔV , através do seguinte cálculo:

$$\Delta V = A \cdot \Delta h \cdot n_{ef} = 90 \times 10^6 \times 5,0 \times 0,10 = 45,0 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Essa estimativa é confirmada pelo estudo de oscilação da superfície potenciométrica realizado

por Melo (1995). Portanto, comparando-se os valores de V_R e ΔV , pode-se admitir que o aquífero se encontra em equilíbrio quase estacionário para uma resolução temporal anual.

Realizando-se o balanço hídrico dos volumes anuais de aporte e de retirada de água do aquífero, tem-se:

$$\eta_I \cdot V_P + V_R = V_E + V_{FS} \quad (1)$$

sendo $\eta_I \cdot V_P = V_I$, o volume médio anual infiltrado efetivo ou a recarga natural decorrente da precipitação de chuva; V_R , o volume de água servida que percola no subsolo; V_E , o volume anual explotado; V_{FS} , o volume anual correspondente à descarga dos fluxos subterrâneos que se dirigem aos cursos d'água e ao mar. Substituindo as variáveis por seus valores estimados, obtém-se:

$$140 \times 10^6 \times \eta_I + 47 \times 10^6 = 62 \times 10^6 + V_{FS} \quad (2)$$

ou

$$140 \cdot 10^6 \cdot \eta_I - V_{FS} = 15 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Estudos realizados por Melo (1995) e Righetto (2002) sugerem um valor estimativo médio para η_I em torno de 0,40. Assim, o volume infiltrado de recarga, V_I , e o volume correspondente aos fluxos subterrâneos, V_{FS} , são estimados, respectivamente, em:

$$V_I = 0,40 \times 140 \times 10^6 = 56 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_{FS} = 41 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Admitiu-se que o volume atual de água armazenado no aquífero pode ser estimado pela repartição da área superficial de infiltração em três regiões: a de contribuição ao fluxo subterrâneo para a linha costeira, $A_{co} = 54 \times 10^6 \text{ m}^2$; a de contribuição ao rio Potengi, $A_{po} = 13,5 \times 10^6 \text{ m}^2$; e a de contribuição ao rio Pitimbu, $A_{pi} = 22,5 \times 10^6 \text{ m}^2$, avaliadas pelo mapa potenciométrico, Figura 1. Com esses valores e com as espessuras médias das camadas saturadas dessas três zonas do aquífero Dunas / Barreiras, avaliadas por Melo (1995), respectivamente, em $H_{co} = 50 \text{ m}$; $H_{po} = 36 \text{ m}$; $H_{pi} = 39 \text{ m}$, calcula-se o valor do armazenamento atual pela expressão seguinte:

$$X(t_1) = (A_{co} \cdot H_{co} + A_{po} \cdot H_{po} + A_{pi} \cdot H_{pi}) \cdot \eta_{gf} \quad (4)$$

ou

$$X(t_1) = (54 \times 50 + 13,5 \times 36 + 22,5 \times 39) \times 10^6 \times 0,10 = 406 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Recarga anual

Considerando que em média, o aquífero encontra-se em condição quase estacionária, principalmente, devido ao retorno da água servida, tem-se, então, que a recarga anual efetiva do aquífero, V_G , isto é, a recarga que efetivamente contribui para a recuperação do aquífero, equivale ao volume explorado, V_E , ou seja:

$$V_G = V_E = 62 \times 10^6 \text{ m}^3$$

O volume de retorno de água servida é significativo, estimado em $V_R = 47 \times 10^6 \text{ m}^3$. Então, a recarga anual natural efetiva para o aquífero Dunas / Barreiras em Natal é avaliada em:

$$G(X) = (62 - 47) \times 10^6 = 15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \quad (5)$$

Para maior clareza, convém explicitar as definições de recarga empregadas. A recarga natural é entendida como sendo a infiltração profunda que chega à superfície potenciométrica do aquífero, proveniente das precipitações pluviais sobre a área de exploração. A recarga de águas servidas corresponde ao retorno de águas de abastecimento através de fossas e sumidouros. A recarga total é a soma da recarga natural e da recarga das águas servidas. A recarga efetiva total é a recarga total menos as perdas de água pelos fluxos subterrâneos naturais do aquífero. E a recarga efetiva natural é a recarga natural menos as perdas pelos fluxos subterrâneos.

Recuperação natural do aquífero

A avaliação da recuperação natural de armazenamento de água do aquífero em função do tempo, caso fosse interrompido a exploração e o lançamento de efluente, é realizada pelo balanço hídrico entre a água infiltrada, V_I , o fluxo subterrâneo V_{FS} , e a variação temporal de armazenamento de água, $dX(t)/dt$, Righetto (1998). Primeiramente, é preciso relacionar as descargas dos fluxos subterrâneos com o volume armazenado. Para a condição atual, tem-se:

$$V_{co} + V_{po} + V_{pi} = V_{FS,atual} = 41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \quad (6)$$

sendo V_{co} , V_{po} e V_{pi} , respectivamente, os volumes anuais que percolam para o mar, para o rio Potengi e para o rio Pitimbu. Utilizando a equação de Darcy, tem-se que as descargas subterrâneas em m^3/s nas direções da frente costeira, Q_{co} ; do rio Potengi, Q_{po} ;

e do rio Pitimbu, Q_{pi} , são, respectivamente, expressas por:

$$Q_{co} = (K.H.L.I)_{co} = 2,9 \times 10^{-4} \times 12 \times 10^3 H.I_{co} = 3,48 H.I_{co} \quad (7)$$

$$Q_{po} = (K.H.L.I)_{po} = 8,5 \times 10^{-5} \times 11 \times 10^3 (H-14) I_{po} = 0,935 (H-14) I_{po} \quad (8)$$

$$Q_{pi} = (K.H.L.I)_{pi} = 3,05 \times 10^{-4} \times 10 \times 10^3 (H-11) I_{pi} = 3,05 (H-11) I_{pi} \quad (9)$$

sendo K , a condutividade hidráulica, H , a espessura média do aquífero na direção costeira, L , a largura horizontal de cada compartimento e I , a declividade da superfície potenciométrica. Para a condição atual e com dados levantados, tem-se a estimativa de $H = 50 \text{ m}$. As avaliações das descargas para o mar, para o rio Potengi e para o rio Pitimbu, resultam em valores, respectivamente, iguais a 49,1%, 17,3% e 33,6% da descarga total (Melo, 1995). Com os valores estimados de K e de L das três sub-regiões apresentadas na Tabela 1, são calculados valores das declividades médias da superfície freática dessas sub-regiões:

Tabela 1 – Valores de K e L das sub-regiões.

Sub-região	$K \text{ (m/s)}$	$L \text{ (m)}$
co	$2,9 \times 10^{-4}$	12000
po	$8,5 \times 10^{-5}$	11000
pi	$3,05 \times 10^{-4}$	10000

$$I_{co} = \frac{0,491 \times 41 \times 10^6}{365 \times 86400 \times 3,48 \times 50} = 0,00367 \quad (10)$$

$$I_{po} = \frac{0,173 \times 41 \times 10^6}{365 \times 86400 \times 0,935 \times 36} = 0,00667 \quad (11)$$

$$I_{pi} = \frac{0,336 \times 41 \times 10^6}{365 \times 86400 \times 3,05 \times 39} = 0,00367 \quad (12)$$

Adotando-se uma relação linear entre as declividades potenciométricas e as alturas d'água do aquífero, isto é:

$$I = \frac{I_{ref}}{H_{ref}} H \quad (13)$$

obtem-se, então, a expressão que relaciona a descarga do fluxo subterrâneo, Q_{FS} , e a altura da água armazenada no aquífero, H , ou seja:

$$Q_{FS} = Q_w + Q_{po} + Q_{pi} = 3,48 \frac{0,00367}{50} H^2 + 0,935 \frac{0,00673}{36} (H-14)^2 + 3,05 \frac{0,00367}{39} (H-11)^2 \quad (14)$$

ou

$$0,000255H^2 + 0,000175(H-14)^2 + 0,000287(H-11)^2 = Q_{FS} \quad (15)$$

com H em m e Q_{FS} em m^3/s . Com a descarga em m^3/ano , denotada por V_{FS} , a expressão torna-se:

$$8041H^2 + 5519(H-14)^2 + 9051(H-11)^2 = V_{FS} \quad (16)$$

ou

$$22611H^2 - 353654H + 2176895 = V_{FS} \quad (17)$$

Através da equação (17) pode-se estimar o valor de H para a condição estacionária e natural, de igualdade entre a recarga natural por infiltração de chuva e o fluxo subterrâneo anual. Denotando a altura de água nessa condição natural por H_{nat} , tomando-se o valor da recarga igual ao volume anual infiltrado, estimado em $V_I = 56.10^6 m^3/ano$, e resolvendo a equação do 2º. grau, obtém-se:

$$H_{nat} = 57,5 \text{ m} \quad (18)$$

Finalmente, através do balanço entre a recarga natural, o fluxo subterrâneo e a variação temporal do armazenamento do aquífero, consegue-se determinar o enchimento do aquífero em função do tempo sob condições naturais. Pela equação da continuidade, tem-se:

$$V_I - V_{FS} = \frac{dX}{dt} \quad (19)$$

Estimou-se, anteriormente, que $V_I = 56.10^6 m^3/ano$; V_{FS} pode ser substituída por sua expressão dada pela equação (17). Resta expressar X por uma função aproximada de H , ou:

$$X \cong A \cdot \bar{H} \cdot \eta_f \quad (20)$$

ou

$$X = 90 \times 10^6 \times 0,1[0,60H + 0,15(H-14) + 0,25(H-11)] \quad (21)$$

ou ainda:

$$X = 9,0 \times 10^6 (H - 4,85) \quad (22)$$

e, derivando:

$$\frac{dX}{dt} = 9,0 \times 10^6 \frac{dH}{dt} \quad (23)$$

Com esse resultado, exprime-se a equação (19) por:

$$56 \times 10^6 - 22611H^2 + 353654H - 2176895 = 9,0 \times 10^6 \frac{dH}{dt} \quad (24)$$

A expressão de H em função de t é obtida pela integração da equação (24). Assim:

$$t = \int_{50}^{H(t)} \frac{dH}{5,980 - 0,002512H^2 + 0,03929H} \quad (25)$$

Resolvendo a integral, obtém-se:

$$H = \frac{57,26e^{(t+10,21)/4,028}}{1 + e^{(t+10,21)/4,028}} \quad (26)$$

Com a equação (26), foram determinados os pares de valores de H e t apresentados na Tabela 2. Esses valores mostram que a recuperação do armazenamento de água do aquífero tende lentamente ao valor de equilíbrio ($H=57,5$ m) num período em torno de 20 anos. Evidentemente que essa recuperação está associada à aleatoriedade das precipitações anuais, não considerada nessa avaliação.

Com os valores apresentados na Tabela 2 pode-se ajustar uma função logística, expressa genericamente por:

$$X(t) = \frac{\alpha}{1 + \beta \exp[-\lambda t]} \quad (27)$$

aplicável para $t \geq 0$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ e $\lambda > 0$. O uso da função logística para representar o armazenamento foi su-

gerida por Lóaiciga e Leipnik (2001). Tomando-se $X=X(t)=X([H(t)])$ em m^3/m^2 da área de recarga ($A = 90 \times 10^6 m^2$), com os valores de t versus X apresentados na Tabela 2 e utilizando-se o SOLVER do EXCEL foram determinados os parâmetros: $\alpha = 5,239$; $\beta = 0,1597$; $\lambda = 0,2592$ com excelente ajuste, ou seja, as curvas obtidas com os pares de valores da Tabela 2 e os obtidos pela equação (27) são praticamente coincidentes, com o somatório dos desvios ao quadrado igual a $2,6 \times 10^{-5}$. A equação (27) será utilizada na análise de exploração sustentada, utilizando o modelo proposto por Lóaiciga e Leipnik (2001).

Desse balanço, verifica-se que a taxa de exploração atual $E(X) = 62 \times 10^6 m^3$ se iguala à recarga efetiva, V_G , sem risco de o aquífero ser deplecionado a níveis indesejáveis, em longo prazo. Essa situação se manterá desde que a exploração não aumente a níveis que possam resultar em $E(X) > V_G$. Ressalta-se que V_G é decorrente tanto da recarga natural quanto do retorno da água servida. Caso seja implantado o esgotamento sanitário com descarte da água servida para o mar, o aquífero deixaria de receber as taxas elevadas de nitrato, mas também deixaria de receber um volume significativo de água para a sua recarga.

Tabela 2 – Valores associados de H (m) e t (ano) obtidos através da equação (26) e de X , equação (22).

t (ano)	H (m)	X m^3/m^2	t (ano)	H (m)	X m^3/m^2
0,0	50,0	4,51	6,0	55,5	5,08
1,0	51,5	4,67	7,0	55,9	5,11
2,0	52,7	4,79	8,0	56,2	5,13
3,0	53,7	4,88	9,0	56,4	5,16
4,0	54,4	4,96	10,0	56,6	5,18
5,0	55,0	5,02	20,0	57,2	5,23

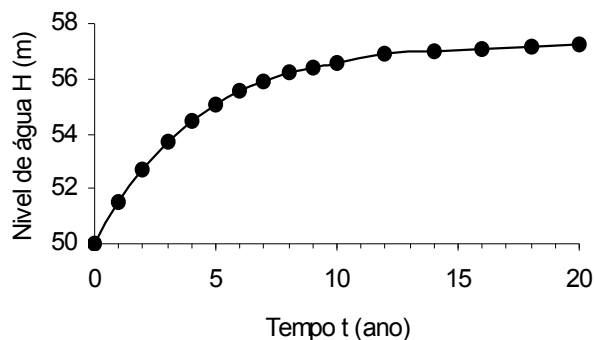


Figura 2 – Curva de enchimento do aquífero em condições naturais de recarga e sem exploração.

Essa situação poderia levar ao colapso do sistema de bombeamento caso fosse mantida a taxa atual de exploração. Nesse caso, haveria obrigatoriamente a necessidade de se buscar água para abastecimento fora da área da cidade, ou seja, com o aporte de água para a cidade, o aquífero poderia ser explorado a taxas bem menores que as atuais, de forma a manter o volume de armazenamento próximo ao valor atual. Pelo balanço hídrico realizado, a recarga natural é de $56 \times 10^6 m^3/ano$ e, em função do volume de água armazenado de equilíbrio do aquífero, se determinaria a profundidade H e o volume total dos fluxos subterrâneos. Na sequência, seria determinado o volume anual de exploração sustentada que seria possível retirar do aquífero dentro da área urbana. De qualquer maneira, o volume explorado, V_E , somado ao volume percolado para os rios e mar, V_{FS} , deve se igualar à recarga natural, avaliada em $56 \times 10^6 m^3/ano$.

A Figura 3 mostra os volumes anuais do fluxo subterrâneo, V_{FS} , e de exploração, $E=G$, em função da altura de água do aquífero, H (m), sem o retorno de água servida.

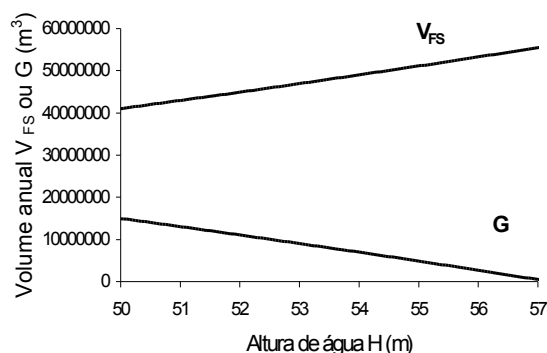


Figura 3 – Volumes anuais percolados para as fronteiras, V_{FS} , e explorados, $E=G$, em função do volume de água armazenado ou altura de água, H .

EXPLORAÇÃO SUSTENTADA

Lóaiciga & Leipnik (2001) apresentaram um modelo de exploração sustentada que considera que o comportamento do armazenamento ao longo do tempo de um aquífero com características hidrogeológicas homogêneas pode ser descrito por uma função logística de recarga. Os autores aplicaram-na a um aquífero confinado. No presente estudo, o do Dunas / Barreiras, tem-se aquífero tipo livre, porém, com delimitação do domínio, o que levou a um excelente ajuste da função logística às previsões de

armazenamento de água do aquífero, apresentadas anteriormente.

Considere um aquífero armazenando o volume de água $X(t)$ num tempo t , submetido a uma taxa de exploração $E[X(t)]$ e com uma taxa natural de recarga $G[X(t)]$.

Pela equação da continuidade tem-se:

$$\frac{dX(t)}{dt} = G[X(t)] - E(X(t)) \quad (28)$$

Se a taxa anual de exploração da água subterrânea é igual à taxa natural de recarga, isto é, $E[X(t)] = G[X(t)]$, então o aquífero está em equilíbrio dinâmico, isto é, na escala anual, há equilíbrio entre as variáveis da recarga e da exploração.

A taxa de exploração da água subterrânea é a variável de decisão. Busca-se o valor de $E[X(t)]$ para alcançar metas objetivas. Já a taxa de recarga natural do aquífero depende do regime climático e das características do aquífero (hidroestratigrafia, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e distribuição potenciométrica).

A função logística é uma possível função para modelar o mecanismo de recarga de água subterrânea. Para o aquífero de Dunas / Barreiras em Natal, foi mostrado anteriormente que a função logística exprime adequadamente o armazenamento de água do aquífero em função do tempo para uma taxa de recarga constante.

Na ausência de extração de água subterrânea, o armazenamento é alterado pela taxa de recarga. Assim, admitindo que a equação (27) descreva a evolução no tempo do armazenamento sob ausência de exploração, então, com a condição de que $dX(t)/dt = G[X(t)]$ obtém-se a seguinte relação entre $G(X)$ e X :

$$G(X) = \lambda X - \frac{\lambda}{\alpha} X^2 \quad (29)$$

sendo que $X \leq \alpha$. O ajuste de $X(t)$ a uma função logística foi verificado para o aquífero Dunas / Barreiras quanto à recuperação de armazenamento a partir da situação atual. As propriedades mais interessantes dessa função na exploração sustentada desenvolvida por Lóaiciga e Leipnik (2001) se aplicam a níveis mais baixos do armazenamento, resultando numa função parabólica para a recarga efetiva e exploração sustentada, correspondente ao armazenamento igual a $\alpha/2$ e exploração máxima igual a $\alpha\lambda/4$. O resultado matemático de que a recarga efetiva tem um valor máximo quando $X=\alpha/2$ precisa de uma justificativa física para a sua aceitação. Possí-

veis explicações incluem as seguintes: com o aumento de X é de se supor que os fluxos subterrâneos crescerão, resultando em menor recarga efetiva; no entanto, com a diminuição de X , a redução da recarga é de natureza mais complexa; a zona de transmissão da camada não saturada do solo estaria sujeita a menores valores dos teores de umidade, o que poderia resultar numa maior retenção de água de sub-superfície e, conseqüentemente, num maior tempo de exposição à evapotranspiração. Outra explicação seria que, devido à influência da componente horizontal da percolação da água na zona não saturada, poderiam ocorrer maiores perdas por capilaridade e evaporação, o que reduziria a recarga efetiva. Vale ressaltar que os gradientes topográficos são bastante acentuados em muitas regiões da cidade devido à formação dunar.

Evidentemente, são conjecturas para tentar justificar a função parabólica para a recarga natural obtida a partir da função logística atribuída a $X(t)$, sem qualquer consideração quantitativa de processos físicos intervenientes. O uso da função logística fora da faixa dos valores de X em que a função foi ajustada pode levar a resultados incompatíveis com a realidade física.

Considerando $E(X)$ constante e substituindo $G(X)$ por sua expressão dada pela equação (28) tem-se:

$$\frac{dX(t)}{dt} = -\frac{\lambda}{\alpha}(X - A)(X - B) \quad (30)$$

tomando-se como condição inicial, $X(t_1=0) = X_1$ e as seguintes expressões para A e B :

$$A = \frac{\alpha}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4}{\alpha\lambda} E} \right] \quad (31)$$

$$B = \frac{\alpha}{2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4}{\alpha\lambda} E} \right] \quad (32)$$

Essas equações têm como restrição $E < \alpha\lambda/4$. Importante observar que, a partir da equação (30), se os valores de $X(t)$ estiverem fora do intervalo $[A, B]$, a taxa de armazenamento será negativa, o que implica em contínuo esvaziamento do aquífero até o seu exaurimento, ou seja, até a superfície potenciométrica atingir a elevação do nível do mar.

Verifica-se que, caso o valor de $X(t)$ esteja fora do intervalo $[A, B]$, a taxa de armazenamento será decrescente. Por outro lado, se $X(t)$ estiver dentro do intervalo $[A, B]$, então, $dX(t)/dt$ é positiva, de sorte que o armazenamento será crescente. A

condição de que $E < (\alpha\lambda)/4$ é condição matemática para manter as variáveis A e B reais. Contudo, essa condição pode ser interpretada como sendo a de máxima recarga, igual a $(\alpha\lambda)/4$, que ocorre quando o armazenamento $X = \alpha/2$.

Do ponto de vista operacional, a condição $E < (\alpha\lambda)/4$ impede que a taxa de exploração exceda à máxima taxa de recarga natural.

A solução analítica da equação (30) é obtida por integração entre o tempo inicial $t_1=0$ até um tempo genérico t (em anos), resultando na seguinte expressão para o armazenamento do aquífero X(t):

$$\left| \frac{X(t)-B}{X(t)-A} \right| = \exp \left[-\frac{\lambda}{\alpha} (B-A) \cdot (t-t_1) \right] \quad (33)$$

sendo $t \geq t_1$ e $A < X(t) \leq \alpha$ restrições de validade das equações (27) e (28). Ressalta-se que essa solução é equivalente à equação (26), obtida através de um equacionamento físico simplificado.

Pela equação (33), verifica-se, para $t \rightarrow \infty$, que $X(t) \rightarrow B$ independentemente do valor inicial de X, isto é, de X_1 ser maior, igual ou menor do que B.

Através da equação (33) obtém-se a seguinte expressão para X(t):

$$X(t) = \frac{B - \varepsilon \cdot A \cdot \left| \frac{X_1 - B}{X_1 - A} \right| \cdot \exp \left[-\frac{\lambda}{\alpha} (B-A) \cdot (t-t_1) \right]}{1 - \varepsilon \cdot \left| \frac{X_1 - B}{X_1 - A} \right| \cdot \exp \left[-\frac{\lambda}{\alpha} (B-A) \cdot (t-t_1) \right]} \quad (34)$$

em que $t \geq t_1$ e $A < X(t) \leq \alpha$. Nessa equação, $\varepsilon = 1$ quando X(t) assume valores fora do intervalo [A,B] e $\varepsilon = -1$ quando dentro deste intervalo. A equação (34) revela que X(t) depende dos parâmetros do aquífero λ e α , do tempo $t-t_1$ e da taxa de exploração E através dos parâmetros A e B.

Para $t \rightarrow \infty$ a equação (34) revela que $X(t) \rightarrow \alpha/2$ que é o valor mínimo admissível de armazenamento com exploração sustentada. Contudo, a importância da equação (34) está na avaliação temporal de X(t) de forma a se definir estratégias de exploração compatíveis com a capacidade do aquífero.

Pela equação da continuidade e na condição de exploração sustentada, para um determinado armazenamento de água do aquífero X(t), obrigatoriamente a exploração $E[X]$ deve se igualar à recarga efetiva do aquífero $G[X]$, tomando-se como unidade temporal, o ano. Essa é a situação de sustentabilidade de exploração do aquífero para uma determinada reserva hídrica subterrânea.

No entanto, caso a taxa de exploração $E[X]$ supere a recarga média anual $G[X]$ então o armazenamento da água subterrânea irá diminuir. De outro lado, se a taxa de recarga é maior do que a taxa de exploração, então, o armazenamento de água subterrânea irá aumentar. Isso equivale a um ajuste de armazenamento de água do aquífero através de uma maior ou menor taxa de recarga. No primeiro caso, devido à maior exploração, X diminui o que promove maior recarga efetiva do aquífero segundo a lei logística ou equação (27). No segundo caso, quando a recarga é superior a exploração, X aumenta, induzindo a redução da taxa efetiva de recarga. Nesse mecanismo, é possível garantir a sustentabilidade de exploração desde que os níveis de ajuste estejam dentro de limites a serem discutidos, a seguir.

Inicialmente, deve ser lembrado que o limite máximo possível de exploração do aquífero corresponde à $G = G_{\max} = \alpha\lambda/4$.

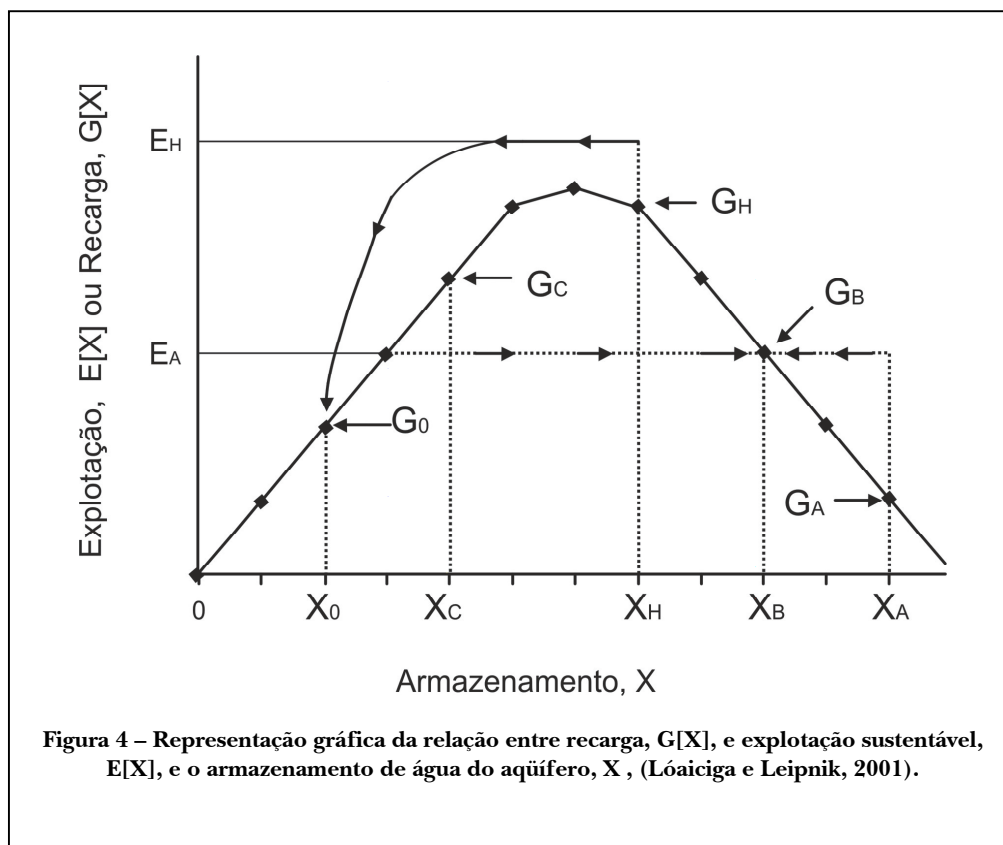
Define-se exploração sustentada quando o armazenamento do aquífero permanece num nível médio anual constante (aceitável) para uma dada taxa de exploração do aquífero. Essa situação não deve ser confundida com a taxa ótima de exploração do aquífero, E^* , a qual pode envolver critério de eficiência econômica ou restrições do meio ambiente.

É interessante analisar o mecanismo de ajuste da recarga para situação temporalmente não sustentável. Assumindo que o aquífero está num nível de armazenamento X_A (Figura 4), será analisada primeiramente a situação em que a razão de exploração do aquífero é igual à $E_A (= G_B)$ excedendo a taxa sustentável dada pela recarga, expressa por G_A . Dinamicamente, o armazenamento do aquífero irá decair até chegar a um valor X_B que resultará em um novo valor para a recarga, $G_B = E_A$ e que corresponde a uma nova condição de sustentabilidade do aquífero.

Um caso particular de interesse refere-se à situação de máxima exploração, ou seja, quando $E = \alpha\lambda/4$. Neste caso, $A=B=\alpha/2$ resultando na seguinte expressão para X(t):

$$X(t) = \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{(1/X_1 - \alpha/2 + \frac{\lambda}{\alpha}(t-t_1))} \quad (35)$$

Uma outra situação é para o caso em que, partindo de um armazenamento X_C , uma taxa de exploração E_A é solicitada abaixo da taxa de recarga



sustentável G_C . Nesse caso, a água armazenada no aquífero irá aumentar até chegar ao nível X_B , no ponto em que a taxa de exploração se iguala exatamente à taxa de recarga G_B . Assim, a taxa de exploração do aquífero é garantida no valor de E_A com sustentabilidade alcançada no valor de armazenamento igual a X_B .

Um terceiro caso a mencionar, é a da situação em que, partindo-se de um armazenamento X_H e solicitada uma taxa de exploração igual a E_H superior à taxa máxima de exploração do aquífero. Essa situação levará a um deplecionamento de armazenamento do aquífero, resultando em decaimento da exploração e ajuste a um valor bastante abaixo do solicitado. A condição de sustentabilidade é alcançada quando o armazenamento atinge o valor X_0 e, neste caso, $E[X_0] = G[X_0] = G_0$.

Para o aquífero Dunas / Barreiras, o valor atual da exploração $E[X(t)] = G[X(t)] = 0,1667 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de área de recarga; respeitando a condição de $E < (\alpha \lambda) / 4$, tem-se que:

$$E < (5,239 \times 0,2592) / 4 = 0,339 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

ou seja, a exploração máxima sustentada é igual a $0,339 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ou $30,6 \times 10^6 \text{ m}^3$. Valor de exploração acima desse valor máximo levaria ao esaurimento do aquífero. Entretanto, caso se queira elevar a exploração em 50%, ou seja, $E = 0,250 \text{ m}^3/\text{m}^2$, pelas equações (31) e (32), obtêm-se que $A = 1,274$ e $B = 3,965$. E com a equação (34) calculam-se os valores de $X(t)$ em função do tempo, em que se verifica que $X(t)$ tende assintoticamente ao valor de B .

Entretanto, convém novamente enfatizar que a igualdade entre a exploração intensiva em Natal e a recarga natural efetiva somente se manterá enquanto água servida estiver retornando ao aquífero. No caso de se proceder ao esgotamento sanitário completo, a recarga passaria a ser igual ao da infiltração efetiva de água de chuva somente, avaliada $0,622 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Nessa condição, a exploração sustentada, com a igualdade $E[X] = G[X]$, seria obtida através da equação (29), sendo o armazenamento $X = X(H)$ obtido pela equação (22). A Tabela 3 for-

nece os valores de X, E e Ap em função de H, sendo Ap o aporte de água necessário para fornecer o volume disponibilizado atual ao abastecimento de água através de poços de bombeamento.

Tabela 3 – Exploração sustentada máxima anual e aporte necessário anual em função de H sem retorno de água servida.

H (m)	X(m ³ /m ²)	E(m ³ /m ²)	Ap(m ³ /m ²)
50	4,515	0,162	0,527
45	4,015	0,243	0,446
40	3,515	0,300	0,389
35	3,015	0,332	0,357
32,2	2,735	0,339	0,350

Com relação às ações a serem realizadas no sistema de água e esgoto da cidade de Natal, duas alternativas principais merecem comentários. No caso de se proceder ao esgotamento sanitário completo e com isso, restabelecer gradualmente a qualidade das águas subterrâneas, o volume máximo anual explotável do aquífero é estimado em torno de $25 \times 10^6 \text{ m}^3$, o que significa, que a maior parte do volume de água requerido para o abastecimento seria obtido através do aporte de outras regiões vizinhas à cidade. Uma outra situação, seria manter a recarga de água servida através de sistemas de tratamento de esgoto que garantissem a qualidade do efluente de forma compatível com as exigências ambientais para que se viabilizasse a sua utilização dentro da área urbana da cidade. Infelizmente essa segunda opção é de difícil implementação pela dificuldade em se remover nitrato nas taxas elevadas de descarga dos esgotos da cidade.

CONCLUSÕES

Foram estabelecidas relações do estado hidrogeológico inerente ao comportamento dinâmico do aquífero com a dinâmica de recarga, os níveis de armazenamento e as taxas de exploração. Baseado nas informações levantadas realizou-se o balanço hídrico para as condições reinantes do aquífero em Natal. A análise refere-se a um armazenamento constante de equilíbrio do aquífero, tomando-se como iguais os volumes efetivos de recarga e de exploração anuais. Para as condições atuais, têm-se os seguintes valores anuais: Volume de recarga natural igual a $V_1 = 56 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$; Volume de retorno de água servida, $V_R = 47 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$; Volume percolado para as fronteiras, $V_{FS} = 41 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$; Volume ex-

plotado, $V_G = 62 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Ressaltam-se aqui os principais resultados:

- A recarga efetiva ainda supre as demandas atuais desde que mantida a situação atual de retorno de grande parte da água servida. Entretanto, não se pode ficar na dependência de um sistema vulnerável tanto à recarga natural quanto à infiltração de água servida uma vez que questões de ordem ambiental poderão desequilibrar o balanço hídrico deste sistema. A recarga não depende apenas da precipitação pluviométrica, mas ela é fortemente influenciada pela ação da urbanização crescente que tem como consequência a impermeabilização do solo, fazendo com que parte da água precipitada não atinja o lençol subterrâneo. Urge, portanto, a adoção de medidas preventivas que protejam a bacia de captação, dentre elas, a regulamentação da exploração efetuada por terceiros.
- Desde que as condições de recarga não se modifiquem isto é: que sejam mantidas as condições atuais de infiltração da água de chuva e retorno da água servida ao aquífero, o abastecimento da área estudada estará garantido por longo tempo, às custas de maior contaminação do aquífero, a não ser que sejam implantadas estações altamente eficientes de tratamento do esgoto.
- Caso seja eliminado o retorno de água servida para o aquífero, concluiu-se que o sistema de exploração entraria rapidamente em colapso com os volumes atuais de bombeamento. No entanto, é preciso se avaliar com experimentação em campo o valor mais provável da recarga natural efetiva do aquífero. A exploração do aquífero Dunas / Barreiras exige preocupação em função das crescentes demandas e dependência do retorno de água servida. Ressalta-se que, devido ao fato da taxa de crescimento populacional requerer maiores volumes de água e da tendência de redução da recarga efetiva do aquífero e da redução significativa da água servida, poderá ocorrer forte rebaixamento do nível potenciométrico, com riscos de colapso no sistema de bombeamento e, até mesmo, de possível intrusão salina. A alternativa seria buscar novos mananciais fora do perímetro urbano e explorar de forma sustentada o aquífero Dunas / Barreiras.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro dos objetivos do projeto PRONEX, Processo 930.906.337-3. Os autores agradecem os revisores da RBRH pela excelente colaboração nas sugestões e nas correções.

REFERÊNCIAS

- ACQUAPLAN (1988). Avaliação das Possibilidades de Infiltração de Efluentes Domésticos no Aquífero Dunas na Área de Natal. Estudo, Projetos e Consultoria. Recife, PE.
- CAERN (2000). Planta da Cidade de Natal, Escala 1: 20.000 – Captação de Poços Área Sul.
- CAERN (1993) Mapa Potenciométrico do Aquífero Dunas / Barreiras em Natal. Relatório Interno.
- LOAICIGA H. A. E Leipnik R. B. (2001) Theory of sustainable groundwater management: an urban case study, Urban Water, Vol. 3: p.217-228.
- MELO, J. G. (1995) Avaliação dos Riscos de Contaminação e Proteção das Águas Subterrâneas de Natal / RN. UFRN / CAERN: 232p.
- RIGHETTO, A. M. (1998) Hidrologia e Recursos Hídricos. Edição EESC-REENGE, São Carlos, EESC: 820p.

RIGHETTO A. M. (2002) Modelo Chuva-Vazão para Bacias Litorâneas Muito Permeáveis. Anais de VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Maceió, AL. Impressão eletrônica em CD:18p.

Sustainable Exploitation of Dunas / Barreiras Aquifer in Natal, RN

Sustainable Use of the Dunas / Barreiras Aquifer in Natal, RN

ABSTRACT

The water supply of the city of Natal, RN, Brazil is obtained mainly from the Dunas / Barreiras aquifer in the urban area. Due to the rapid development of the city and the limited amount of natural recharge to the aquifer, studies must be developed for a reliable evaluation of the water balance and aquifer vulnerability. This study deals with the evaluation of water balance, including natural recharge, water exploitation, water losses to rivers and sea, and wastewater reuse. A sustainable use model is applied in order to specify the optimal exploitation as a function of aquifer characteristics and recharge. The problem of nitrate contamination is also considered. The results show the need to maintain the present level of recharge and water reuse in order to ensure groundwater use sustainability. Another alternative is to import water from neighboring areas.

Key words: aquifer; water balance; sustainable use