

ESTUDOS CLIMÁTICOS COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DO USO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA. O EXEMPLO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO, BRASIL

Hélio Nóbile Diniz*

Paulo Ricardo Brum Pereira**

Uriel Duarte***

1. ASPECTOS CLIMÁTICOS E FISIOGRÁFICOS DA ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BAQUIRIVU-GUAÇU, NO LOCAL DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

Segundo FETTER (1988) o ciclo hidrológico pode ser quantificado a partir da equação hidrológica, que se baseia na lei de conservação das massas. É expressa por: **entrada d'água = saídas +/- mudanças no armazenamento.**

RUSHTON & WARD (1979) adotam a seguinte expressão para o balanço hídrico: $P = E + R + \Delta s$ onde; **P**=precipitação, **E**=Evapotranspiração, **R**=escoamento superficial e Δs =incremento no armazenamento.

Para CUSTODIO & LLAMAS (1983) o balanço hídrico é a aplicação do princípio da conservação da massa (equação da continuidade) a uma certa região cujo volume é conhecido e definido por determinadas condições de contorno. Durante o período em que o balanço é realizado, a diferença entre o total das entradas e o total das saídas deve ser igual à mudança de água do armazenamento. As medidas podem ser efetuadas em massa ou, em volume se a densidade da água for constante.

A bacia hidrográfica representa um sistema fechado. As entradas de água advêm das precipitações. As saídas d'água do sistema são devidas à evapotranspiração e descarga do rio principal. Nas condições climáticas do sudeste brasileiro os aquíferos estão saturados e em equilíbrio com as águas mantidas na superfície, já que normalmente há excedente hídrico. Assim, não deve ocorrer mudanças de armazenamento para uma série histórica de medidas multianuais, podendo ocorrer pequenas mudanças somente durante o ano hidrológico, em relação aos períodos de máxima e mínima pluviosidade. Nestas condições, as mudanças de armazenamento da

* Pesquisador Científico III do Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Est.de S.Paulo
Av. Miguel Stefano, 3900 - Água Funda
Fone: (011) 276-8721 - Fax: (011) 276-8572
CEP 04301-990 - São Paulo - SP - Brasil

** Pesquisador Científico I do Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Est.de S.Paulo
Av. Miguel Stefano, 3900 - Água Funda
Fone: (011) 276-8721 - Fax: (011) 276-8572
CEP 04301-990 - São Paulo - SP - Brasil

*** Professor do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo
Rua do Lago, 562 - Cidade Universitária
Fone: (011) 818-4226 - Fax: (011) 818-4207
CEP 05508-900 - São Paulo - SP - Brasil

água do aquífero são devidas às descargas nas fontes. A captação de água através de poços pode provocar mudanças significativas no armazenamento do aquífero se a taxa de recarga for menor que a de extração.

Como as entradas e saídas de água do sistema podem ser quantificados em uma bacia, nesta pesquisa adotou-se a área geográfica da bacia do rio Baquirivu-Guaçu para estimar o potencial hidrogeológico da região onde está situado o Aeroporto Internacional de São Paulo, na parte central do Município de Guarulhos.

Na área da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu existem dois postos pluviométricos com medidas históricas diárias das precipitações. São os Postos Bairro Fazenda Velha e Bonsucesso.

O Posto Bairro Fazenda Velha, E3-050 do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, situa-se a nordeste da área, no Município de Arujá, nas coordenadas UTM 362,05 km EO e 7413,45 km NS. Possui uma série histórica de medidas diárias desde 1965.

O Posto Bonsucesso, E3-002 do DAEE, situa-se na parte central da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu, no Bairro Bonsucesso, nas coordenadas UTM 356,95 km EO e 7409,60 km NS. Possui uma série histórica de medidas diárias desde 1965.

Como a região da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu não é homogênea, pois o relevo é formado tanto por serras quanto por planaltos, há diferenças locais nas precipitações e nas temperaturas médias anuais, em cada posto de medição. Neste trabalho, para representar a pluviometria, foi escolhido o Posto Bonsucesso situado no centro da bacia e que, por esta razão, representa melhor as condições climáticas da bacia.

Utilizando-se os dados hidrometeorológicos do Posto Bonsucesso, foi elaborado um balanço hídrico com o auxílio do programa de microcomputador BALASC, desenvolvido por pesquisadores da UNICAMP a partir do modelo de THORNTHWAITE & MATHER (1955) e adaptado às condições do sudeste brasileiro (CAMARGO, 1960).

As temperaturas médias utilizadas no modelo foram obtidas das cartas de estimativas médias mensais para a região sudeste do Brasil, de CAMARGO & GHIZZI (1991). A capacidade de campo, que indica o menor valor de altura de água de armazenamento para que haja recarga profunda (quando a água passa a escoar do solo para o aquífero), variável para cada tipo de solo, foi adotada com um valor constante de 125mm.

Foi feito um balanço hídrico multianual para o Posto Fazenda Velha (FIGURA 1), situado em Arujá, nas encostas da Serra da Mantiqueira, a partir dos dados históricos de precipitação, do período 1965-1994, da TABELA 1 e outro, para o Posto Bonsucesso (FIGURA 2), situado no Bairro Bonsucesso, na planície de inundação do rio Baquirivu-Guaçu, em Guarulhos, a partir dos dados históricos de precipitação, do período 1965-1994, da TABELA 2. As diferenças encontradas para os dois gráficos são devidas às condições fisiográficas de cada área, embora próximas, mas com características climáticas próprias.

2. OS POÇOS DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO

O abastecimento de água do Aeroporto Internacional de São Paulo/Cumbica (AISP) é inteiramente suprido por água subterrânea, proveniente de 7 poços tubulares profundos totalmente penetrantes dentro do sistema aquífero sedimentar da Bacia de São Paulo. Os poços possuem profundidades variáveis, entre 115,50m e 195,50m e fornecem em média 2.700 m³/dia. Estes poços estão situados no lado oeste do Aeroporto, junto à via de acesso, Av. Jamil João Zarif, na margem esquerda do rio Baquirivu-Guaçu.

O aquífero explorado é constituído por arenitos, argilitos e conglomerados, consolidados e inconsolidados, da Formação Resende, da Bacia Sedimentar de São Paulo. A análise dos perfis geológicos e a perfilagem de raios gama, potencial espontâneo e resistividade realizadas nos poços durante a fase de perfuração, forneceu para a coluna geológica do local uma porcentagem de litotipos lamíticos (silte e argila) aproximadamente igual à porcentagem de clásticos grossos (areias finas a grossas e conglomerados).

No Aeroporto Internacional de São Paulo a Bacia Sedimentar de São Paulo esteve sujeita a uma sucessão de esforços tectônicos durante a sua fase de sedimentação, formando o sistema de *grabens* e *horsts* do Baquirivu-Guaçu, conhecida como Graben do Baquirivu-Guaçu (RICCOMINI, 1989) com uma topografia do embasamento extremamente irregular, constituída por um paleo-relevo bastante abrupto, formado por blocos altos e baixos e com grande variação litológica lateral. Como consequência, os poços construídos nos sedimentos, mesmo quando situados próximos, atingem o topo rochoso a profundidades bem diferentes, com variações faciológicas importantes, que tornam bastante imprevisível o comportamento hidráulico do aquífero e conseqüentemente, as vazões dos poços (DINIZ *et al.*, 1994; DINIZ, 1996).

A operação dos poços no AISP iniciou-se, de forma pioneira, em 1984. Nesta época o nível estático nos poços situava-se a 10m de profundidade, sendo controlado pelo nível de base do rio Baquirivu-Guaçu. O lençol freático aflorava em alguns locais devido à existência de uma sucessão de camadas argilosas e arenosas pouco profundas, formando aquíferos freáticos contendo níveis suspensos. Em superfície o terreno era pantanoso e alagadiço.

Em profundidade, predomina uma sucessão de camadas arenosas intercaladas por finas camadas argilosas, resultando em um aquífero poroso multicamada.

O AISP foi construído numa área pantanosa da várzea do rio Baquirivu-Guaçu, contendo uma seqüência de camadas argilosas e turfosas próximas da superfície que produzem uma acentuada impermeabilização natural. Como consequência, é lenta a recarga natural do aquífero sedimentar, constituído por camadas arenosas, situadas sob as argilosas.

As condições naturais do terreno aliada às mudanças na cobertura, devido ao aterro nas áreas das pistas e locais onde foram construídas as instalações da infraestrutura aeroportuária, por material argiloso compactado com espessura de até 2m, tornaram praticamente impermeável a superfície ocupada pelo Aeroporto.

Às condições de impermeabilização do terreno foi associado um regime exploratório intensivo dos poços perfurados para atender a demanda crescente das Companhias Aéreas e passageiros. Isto fez com que as reservas renováveis de água subterrânea esgotassem, pois assim que o lento fluxo descendente da água infiltrada pelas precipitações atinge o aquífero, em profundidade, é sugado pelo sistema de bombeamento dos poços.

Esta taxa de exploração elevada é facilitada pelas condições geológicas do sistema aquífero sedimentar, com camadas arenosas em profundidade, muito permeáveis, que permitem a extração de vazões consideravelmente elevadas (atualmente os poços fornecem cerca de 35 m³/h em média, mas no início das operações chegavam a 120 m³/h).

As taxas de extração vem provocando uma queda nos níveis piezométricos de até 0,40 m/mês. Estes níveis que situavam-se originalmente na profundidade de 10m, chegaram em janeiro de 1995 a 61m de profundidade (totalizando mais de 50m de descida). Conseqüentemente, a perda na produtividade dos poços foi grande, mesmo com os cuidados que sempre foram tomados pelo Setor de Manutenção do Aeroporto Internacional de São Paulo, com períodos de bombeamento inferiores a 12 h por dia e sempre seguidos de um tempo igual de recuperação do aquífero.

3. CORRELAÇÕES CLIMÁTICAS E HIDROGEOLÓGICAS NA BACIA DO RIO BAQUIRIVU-GUAÇU

Para efeito de correlações, foram realizados balanços hídricos anuais, representado por médias mensais no intervalo entre 1989 e 1994, já que neste período dispõe-se de dados de monitoramento dos níveis dos poços do Aeroporto Internacional de São Paulo/Cumbica, executado pela INFRAERO - Empresa de Infraestrutura Aeroportuária.

Neste período é possível fazer-se correlações entre os níveis estáticos e dinâmicos e vazões com as precipitações, através do parâmetro capacidade específica, dado pela expressão $C_{esp.} = Q/(ND-NE)$, onde $C_{esp.}$ = capacidade específica do poço, ND = nível dinâmico e NE = nível estático. Esta correlação permitiu conhecer o comportamento do aquífero frente aos períodos secos e chuvosos.

Verificou-se que a correlação entre as precipitações e a capacidade específica (ou seja, entre os níveis estáticos, dinâmicos e vazões) dos poços do Aeroporto Internacional de São Paulo é muito baixa, entre 20 e 27%, com média de 23%, mostrando que não há resposta significativa (dentro do intervalo de medidas médias de 1 mês) do aquífero frente às precipitações. Isto demonstra que o tempo para o fluxo advindo da superfície infiltrar até o aquífero é longo (em média de 4 meses, estimando-se velocidades verticais do fluxo de 1m/dia e profundidade média do topo do aquífero de 120m) e o aporte da recarga profunda é constante durante o ano, independentemente da sazonalidade das precipitações devido às profundidades variáveis do topo do aquífero, entre 60 e 180m, e das diferenças na velocidade vertical do fluxo nos sedimentos que não apresentam características hidráulicas (de permeabilidade vertical) uniformes.

Nos poços, a correlação entre o nível estático e nível dinâmico é muito alta, sempre acima de 95%. Uma hipótese que tem sido aventada para o problema de queda de níveis, é que os poços perdem a carga potenciométrica devido à colmatação do pré-filtro e entupimento das ranhuras dos filtros por óxidos de ferro produzidos por

ferrobactérias. Embora alguns dos poços do AISP desenvolvam este tipo de organismo prejudicial, a incrustação não ocorre porque eles sofrem manutenção periódica e, caso a hipótese fosse verdadeira, os valores entre os níveis estáticos e níveis dinâmicos seriam discrepantes. A correlação sempre superior a 95% mostra, de forma clara, que as quedas contínuas de níveis são causadas pelo esgotamento das camadas aquíferas.

4. ALTERNATIVAS PARA RECUPERAÇÃO DO AQUÍFERO SEDIMENTAR

O balanço hídrico realizado com dados hidrometeorológicos do posto E-002 do DAEE - Dep. de Águas e Energia Elétrica, situado no Bairro Bonsucesso em Guarulhos próximo do AISP, mostrou que as precipitações médias atingem cerca de 1.667 mm/ano na região e a evapotranspiração média cerca de 850 mm/ano. Estes valores fazem o excedente hídrico situar-se em torno 802 mm/ano. A água do excedente hídrico está disponível para infiltrar ou para escoar superficialmente como *runoff*.

Frente aos parâmetros hidrodinâmicos encontrados para o aquífero sedimentar da Bacia de São Paulo na região do Aeroporto Internacional de São Paulo/Cumbica e pelas condições atuais de exploração, verifica-se que a melhor alternativa para a recuperação do aquífero no local, seria a recarga artificial da água oriunda das precipitações através de poços tubulares profundos.

Como exemplo, caso fosse captada toda a água precipitada na área das pistas, que possuem 1 km de largura por 4 km de comprimento, onde o total do excedente hídrico anual corresponde a 802 mm/ano, teríamos:

$$802 \text{ mm/ano} \times 1 \text{ km} \times 4 \text{ km} = 3.208.000 \text{ m}^3/\text{ano}.$$

Sabendo-se que o Aeroporto Internacional de São Paulo/Cumbica consome:

$$2.700 \text{ m}^3/\text{dia} \times 365 \text{ dias/ano} = 985.500 \text{ m}^3/\text{ano},$$

verifica-se que somente o excedente hídrico na área das pistas seria suficiente para alimentar o aquífero sedimentar no Graben do Baquirivu-Guaçu, na área do AISP, com o triplo das necessidades atuais.

Como o Graben do Baquirivu-Guaçu, possui a forma de uma bacia quadrática cercada por rochas impermeáveis do embasamento cristalino, não há sequer a possibilidade da água subterrânea escoar para outras partes da região. Assim, ficaria retida na própria área do Aeroporto Internacional de São Paulo ou imediações, constituindo uma ótima forma de armazenamento da água subterrânea para utilização futura.

5.BIBLIOGRAFIA

- CAMARGO, A.P. 1960. O balanço hídrico no Estado de São Paulo. Boletim do Instituto Agrônômico de Campinas, nº 116, Campinas, 24p.
- CAMARGO, A.P.; GHIZZI, S.M. 1991. Estimativa de temperaturas médias mensais com base em cartas de temperatura potencial normal ao nível do mar para a região sudeste do Brasil. Boletim Técnico nº 141, Secr. de Agricultura e Abast.- Coord. da Pesq. Agropecuária, Instituto Agrônômico, Campinas, 17p. e 12 mapas.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. 1983. *Hidrologia Subterranea*. Ed. Omega, Tomo I, Barcelona, 1157p.
- DINIZ, H.N.; DUARTE, U.; KOBAYASHI, H.N. 1994. Hidrogeologia da região do Aeroporto Internacional de São Paulo, Graben do Baquirivu-Guaçu, Município de Guarulhos, SP. *Anais...8º Congr.Bras.de Águas Subterrâneas, ABAS/DNPM/CPRM, Recife, dezembro de 1994, p.457-466.*
- DINIZ, H.N. 1996. *Estudo do potencial hidrogeológico da bacia hidrográfica do rio Baquirivu-Guaçu, Municípios de Guarulhos e Arujá, SP*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 296p.
- FETTER, C.W. 1988. *Applied hidrogeology*. 2ª Ed., Macmillan Publ. Comp., New York, 592p.
- RICCOMINI, C. 1989. *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. Tese de doutoramento, São Paulo, Instituto de Geociências da Univ.de São Paulo, 256p. (inédita).
- RUSHTON, K.R.; WARD, C. 1979. The estimation of groundwater recharge. Elsevier Scientific Publishing, *Journal of Hidrology*, **41**, p.345-361.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. 1955. The water balance. Drexel Institute of Technology, Publications in climatology, **8**(1), Canterton, New Jersey, 104p.

TABELA 1. Balanço hídrico segundo THORNTHWAITE & MATHER (1955)

Local: Bairro Fazenda Velha

Latitude: 23° 23' Longitude: 46° 21'

Altitude: 760m

Armazenamento máximo = 125mm

Fonte e Período: Posto E3-050 (1965-1994)

Temperatura: CAMARGO & GHIZZI (1994)

MESES	Temp. (°C)	Precipit. (mm)	Evap.Pot. (mm)	Evap.Real (mm)	Excedente (mm)
JAN	22	232	110	110	122
FEV	21,9	223	94	94	129
MAR	21,1	177	91	91	86
ABR	18,9	90	67	67	23
MAI	16,9	79	53	53	26
JUN	15,4	59	41	41	18
JUL	14,6	45	39	39	6
AGO	16,4	44	52	52	0
SET	17,7	84	61	61	15
OUT	19,2	125	79	79	46
NOV	19,8	161	85	85	76
DEZ	20,3	201	95	95	106
ANO	18,7	1520	865	865	655

Índice hídrico: 75,7 - Clima úmido, Mesotérmico

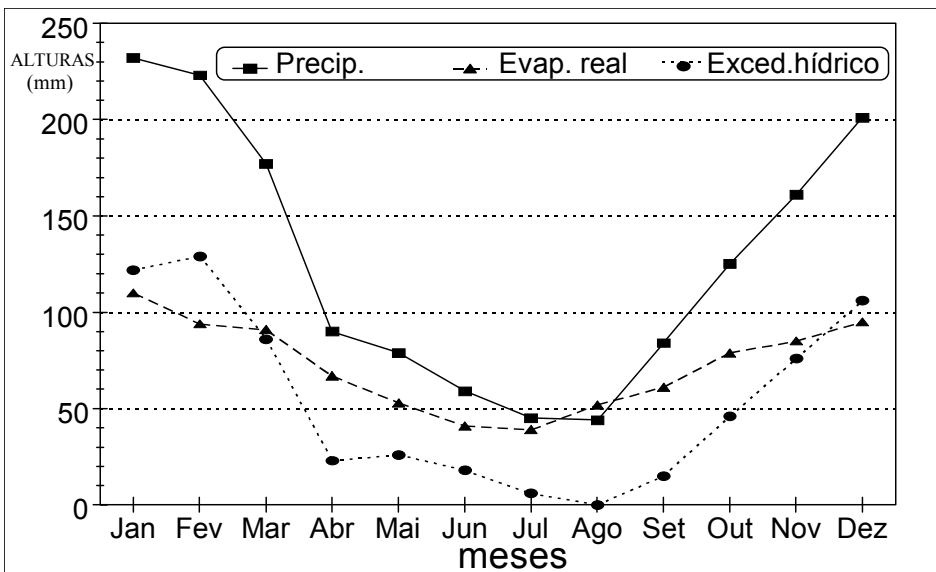


FIGURA 1. Balanço hídrico no Posto Bairro Fazenda Velha, no período 1965-1994.

TABELA 2. Balanço hídrico segundo THORNTHWAITE & MATHER (1955)

Local: Bonsucesso

Latitude: 23° 25'

Longitude: 46° 24'

Altitude: 770m

Armazenamento máximo = 125mm

Fonte e Período: Posto E3-002 (1965-1994)

Temperatura: CAMARGO & GHIZZI (1994)

MESES	Temp. (°C)	Precipit. (mm)	Evap.Pot. (mm)	Evap.Real (mm)	Excedente (mm)
JAN	22	264	110	110	154
FEV	21,9	209	94	94	115
MAR	21,1	193	91	91	102
ABR	18,9	103	67	67	36
MAI	16,9	91	53	53	38
JUN	15,4	64	41	41	23
JUL	14,6	50	39	39	11
AGO	16,4	47	52	52	0
SET	17,7	97	61	61	31
OUT	19,2	149	79	79	70
NOV	19,8	165	85	85	80
DEZ	20,3	235	95	95	140
ANO	18,7	1667	865	865	802

Índice hídrico: 92,7 - Clima úmido, Mesotérmico

