

# FATORES CONDICIONANTES NA RECARGA DO AQUIFERO AÇU NA BORDA SUDOESTE DA BACIA POTIGUAR (RN)

## CONDITIONING FACTORS OF THE AÇU AQUIFER RECHARGE ON THE SOUTHWEST BORDER OF THE POTIGUAR BASIN, RIO GRANDE DO NORTE STATE, BRAZIL.

José Geraldo de Melo<sup>1</sup>; Paula Stein<sup>1</sup>;  
Mickaelon Belchior Vasconcelos<sup>1</sup> e Fabio Henrique Roque da Silva<sup>1</sup>

Recebido em: 29/03/2005; aceito em: 25/09/2005

**RESUMO** A Borda Sudoeste da Bacia Potiguar, no Rio Grande do Norte, está situada em domínio semi-árido com precipitações pluviométricas médias de 765,1 mm/ano. O aquífero Açú é o principal recurso hídrico disponível para o suprimento das populações com água potável e uso na irrigação, desempenhando, portanto um papel importante no desenvolvimento da região. A captação de água é feita através de poços, os quais fornecem vazões muito variadas, desde menos de 5 m<sup>3</sup>/h até 80 m<sup>3</sup>/h, atestando condições de heterogeneidade, o que tem limitado o uso das águas subterrâneas em maior escala. Os dados geológicos, estruturais e geofísicos (sondagens elétricas verticais e condutância longitudinal) mostram que a área é formada por altos e baixos estruturais. De conformidade com os resultados dos estudos hidrogeológicos realizados, isto condiciona a ocorrência de setores com diferentes potencialidades. Verificou-se que a transmissividade do aquífero cresce no sentido de sul para norte segundo a direção do fluxo subterrâneo, com valores de menos de 10 m<sup>2</sup>/dia até 280 m<sup>2</sup>/dia, evidenciando, portanto maiores potencialidades do aquífero Açú na faixa norte da área. A recarga das águas subterrâneas foi avaliada em 54 milhões de m<sup>3</sup>/ano, sendo que mais de 90% deste recurso é armazenado no setor norte da área.

Palavras chave: Semi-árido, água subterrânea, recarga, fluxo subterrâneo.

**ABSTRACT** The Potiguar Basin Southwest border, on Rio Grande do Norte State, is situated in the semi-arid region and the precipitation is about 765.1 mm/year. The Açú aquifer is the main water source of supply to the population and to land irrigation. The wells bored in the area, however presents very different production, whose yields go from less than 5 m<sup>3</sup>/h up to 80 m<sup>3</sup>/h. It is the main reason of limiting the use of the groundwater. As shown by the geological, structural and geophysical dates (vertical electrical profiles and longitudinal conductance) there are high and low geological structures. According to the studies carried out, these characteristics results in various sectors of different hydrogeologic potentialities. The aquifer transmissivity increases following the flux direction from south to north, changing from less than 10 m<sup>2</sup>/d to 280 m<sup>2</sup>/d, characterizing the north zone of the area as the best hydrogeologic possibilities. The groundwater recharge was estimated in 54 millions m<sup>3</sup>/year, in which most of it (91.5%) is stored in the north zone of the area.

Keywords: semi-arid, groundwater, recharge, groundwater flow.

### INTRODUÇÃO

A área de estudo está situada na borda sudoeste da Bacia Potiguar à oeste do Estado do Rio Grande do Norte, numa estreita faixa de direção leste-oeste que se estende de Upanema até a fronteira com o Estado do Ceará, ocupando uma superfície de 1320 km<sup>2</sup> (Figura 1).

As águas subterrâneas do aquífero Açú têm sido destinadas, prioritariamente, ao abastecimento das cidades de Apodi, Upanema, Felipe Guerra, Rodolfo Fernandes e Severiano Melo, além de distritos, ressaltando que essas duas últimas cidades e alguns dos distritos estão situados no domínio das rochas cristalinas, onde as águas superficiais e subterrâneas são escassas e em geral salinizadas. Nestes casos, o abastecimento de água é feito através de sistema de adutoras.

A captação de água no aquífero Açú em geral é feita através de poços com profundidades da ordem de 100 m produzindo até 80 m<sup>3</sup>/h. A descarga total bombeada, obtida na fase de cadastramento de poços, é da ordem de 10

milhões de m<sup>3</sup>/ano. O uso da água na irrigação é relativamente pouco desenvolvido, porém mostra tendências para um crescimento expressivo. Há casos, também de industrialização das águas subterrâneas do aquífero Açú como águas minerais ou potáveis de mesa, como é o caso da indústria de Água Mineral Cristalina e a indústria de Água Mineral Santa Luzia, localizadas nos municípios de Apodi e Upanema, respectivamente.

Nos últimos anos o uso das águas do aquífero tem sido limitado pela presença de águas salinizadas em alguns setores, baixas vazões dos poços em muitas situações e pela falta de conhecimento de suas reais potencialidades. O presente artigo enfatiza os aspectos estruturais e de recarga das águas subterrâneas como subsídio à otimização da exploração das águas subterrâneas. fornecem uma primeira indicação de que o aquífero Açú na zona de afloramento da Formação Açú é do tipo livre com fluxo subterrâneo dirigido para norte.

<sup>1</sup>UFRN/ Depto de Geologia/PPGEO (jgmelo@ufrnet.br), (Paulinha\_st@hotmail.com), (mickvasconcelos@yahoo.com.br)

Posteriormente, este comportamento foi confirmado por Manoel Filho (1971). Na planície do Apodi desenvolve-se o aquífero aluvial com espessuras da ordem de 35 m nos seus domínios mais produtores, com cargas hidráulicas

distintamente superiores as do aquífero Açú e descarga descendente em direção ao mesmo, tendo o aquífero Açú sido caracterizado como semi-confinado (SANTOS,1977).

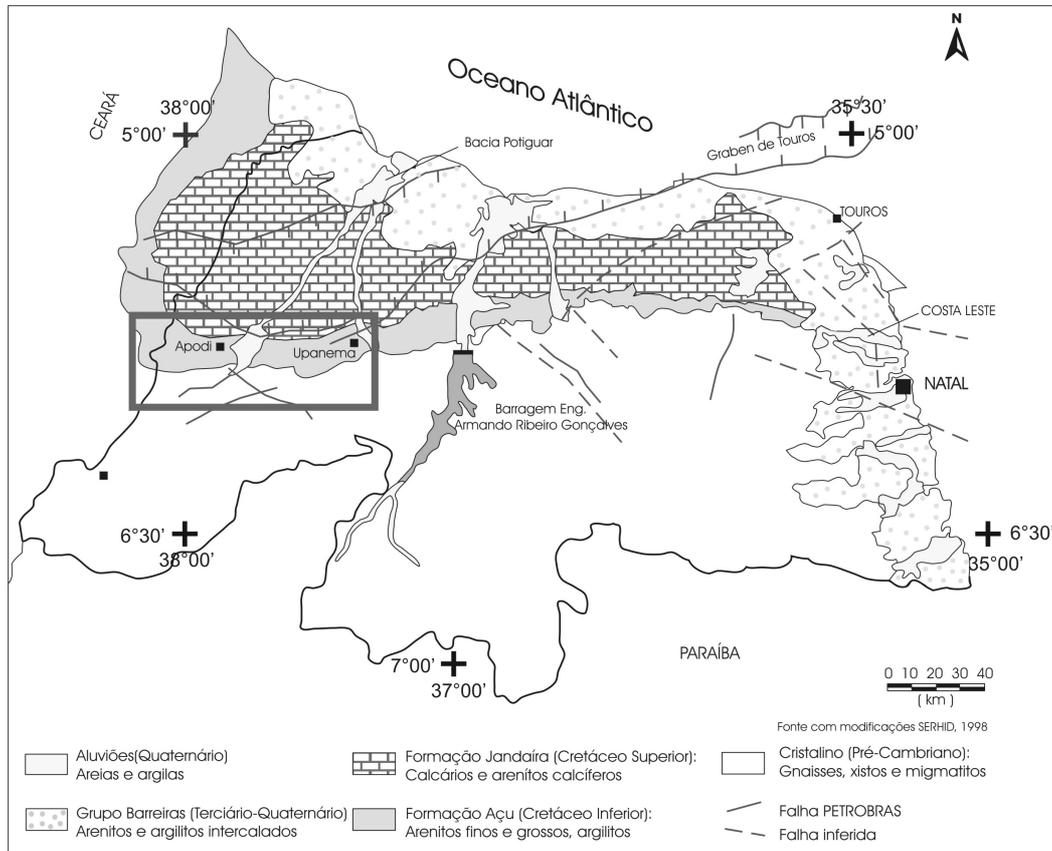


Figura 1.-Localização da área de estudo.

Figure 1- Geographic location of the Rio Grande do Norte State showing the studied region

O aquífero Açú, segundo o IPT (1982), é de baixa potencialidade hidrogeológica na borda oeste da Bacia Potiguar, sugerindo condições de exploração de poços com vazões, no máximo, de 10 m<sup>3</sup>/h. Posteriormente, a partir de 1992, com o desenvolvimento da perfuração de poços na área, foram obtidas descargas da ordem de 60 m<sup>3</sup>/h, o que motivou a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) intensificar as perfurações, para o abastecimento de cidades.

#### METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido segundo as seguintes atividades metodológicas:

a) Coleta e análise de dados - As atividades iniciais consistiram da coleta de dados de caráter bibliográfico, seguido de uma avaliação e sistematização das informações.

b) Cadastro de poços - Compreendeu as seguintes atividades: Identificação e localização exata de cada poço com o auxílio de GPS, e checagem das informações levantadas; medição dos parâmetros construtivos das unidades de

captação, incluindo profundidade, diâmetro, altura da boca do poço e identificação do material de construção; medição e obtenção de informações sobre os parâmetros hidráulicos, tais como nível estático, nível dinâmico, vazão, vazão específica e regime de exploração; identificação do aquífero penetrado: Jandaíra, Açú ou cristalino; avaliação das condições de funcionamento do poço; finalidade do uso da água; reconhecimento da salinidade das águas com o auxílio de condutivímetro portátil.

c) Nivelamento topográfico dos poços - Foi utilizado o sistema de GPS geodésico.

d) Estrutura hidrogeológica - Foi definida com base na correlação lito-estratigráfica de perfis de poços e resultados dos estudos geofísicos.

e) Estudos geofísicos - Foram executados por uma equipe de geofísica do Departamento de Física da UFRN (MEDEIROS et al., 2001) com a utilização de método de eletroresistividade e método gravimétrico.

f) Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Açu - Foram obtidos a partir da interpretação de 41 testes de bombeamento realizados pela Companhia de Águas do Rio Grande do Norte (CAERN) e Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SERHID/RN). Apenas um dos testes realizados dispunha de dados de poço de observação (piezômetro). A interpretação dos resultados dos testes foi efetuada com a aplicação do método de rebaixamento-tempo de Cooper-Jacob (com correção dos rebaixamentos, no caso de aquíferos livres) e método de recuperação de Theis e Jacob. Foi utilizado o software *Aquifer Test* da *Waterloo Hydrogeologic*.

g) Caracterização do fluxo subterrâneo – Foi feita a partir da interpretação de mapa potenciométrico com base no conhecimento das cargas potenciométricas. Os dados foram importados para o *software surfer*, sendo em seguida elaboradas as curvas potenciométricas mediante uma cuidadosa avaliação, e posterior modificações, necessária para uma reprodução mais exata do condicionamento do fluxo no domínio aquífero.

h) Recarga das águas subterrâneas - A recarga das águas subterrâneas foi estimada utilizando diferentes metodologias, tendo em vista a comparação de resultados e adoção de valores que se mostrassem mais representativos para o sistema hidrogeológico considerado. Foram aplicados os métodos do balanço hidroclimatológico, variação do nível da água, Lei de Darcy aplicada ao meio poroso saturado e balanço de cloreto.

#### **CONDICIONANTES CLIMÁTICOS, GEOLÓGICOS E FISIAGRÁFICOS**

As precipitações pluviométricas no domínio da área são em média de 765,1 mm anuais (período 1931-1990), com chuvas concentradas em três ou quatro meses, de conformidade com dados obtidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Os dados climáticos fornecidos pela EMPARN permitiram a caracterização de um “déficit” hídrico na maior parte do ano, o que atribui a área o caráter de semi-aridez. A evapotranspiração potencial é relativamente elevada, atingindo 1542 mm/anos.

O arcabouço geológico básico da região apresentado na Figura 2 mostra que a área de estudo é constituída de arenitos da Formação Açu, na borda sul da Bacia Potiguar, do Cretáceo Superior, com a ocorrência de depósitos Cenozóicos de paleocascalheiras de domínios restritos e coberturas aluviais recentes, com

destaque para a planície aluvial do Apodi. A Formação Açu está sobreposta a rochas do embasamento cristalino pré-cambriano e o seu contato no setor sul da área se faz com estas rochas, no qual distinguem-se corpos granitóides brasileiros, o complexo gnaíssico-migmatítico e os traços de foliações e zonas de cisalhamento, de idade Brasileira ou mais antiga. O limite norte da área se faz com os calcários da Formação Jandaira, do Cretáceo Superior, em alguns trechos envolvendo escarpas retilíneas, as quais podem corresponder a falhas ou fraturas (possível reativação neotectônica de falhas cretáceas ou terciárias, segundo Medeiros et al. (2001).

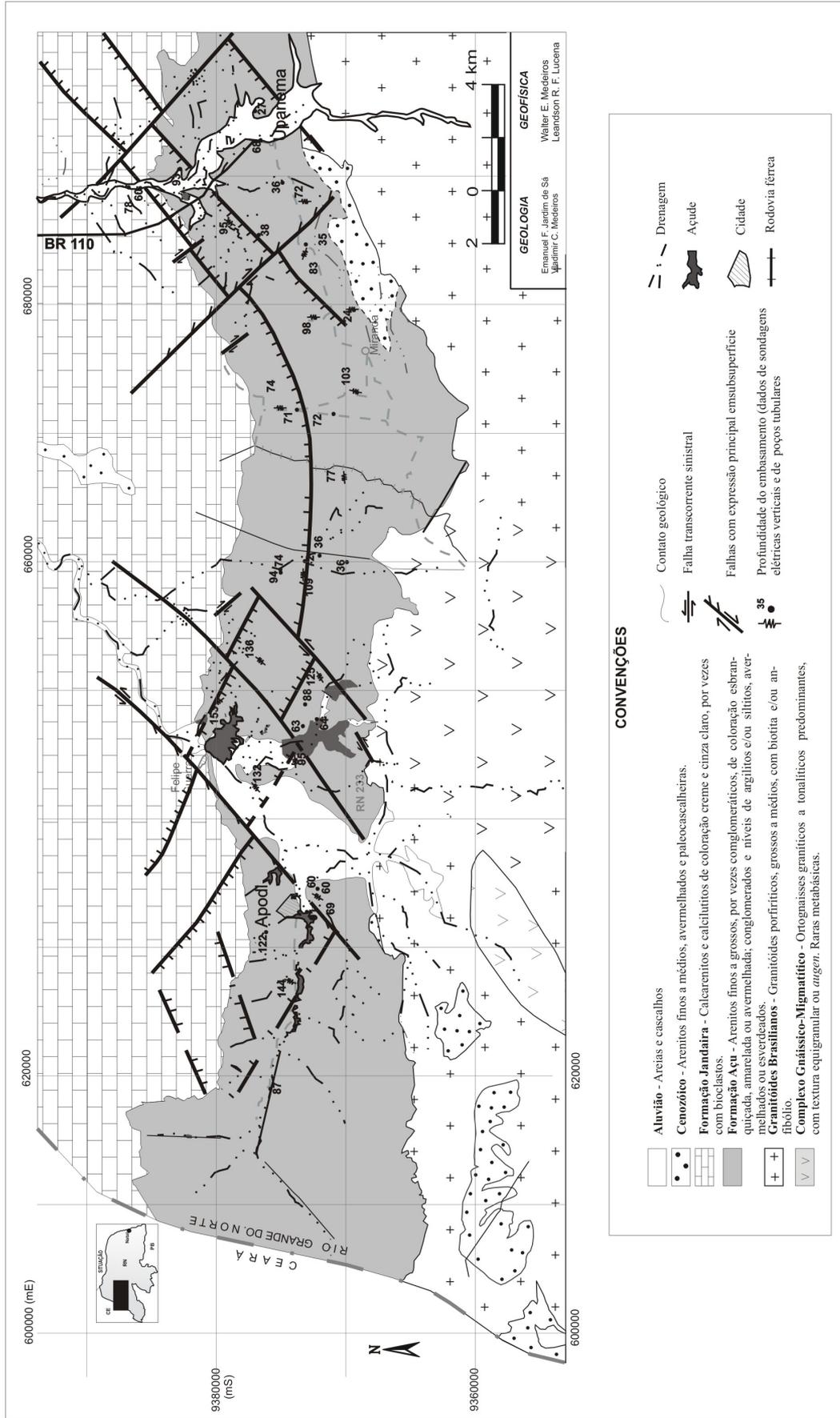
A área é cortada pelos rios Apodi e do Carmo (intermitentes) no sentido de sul para norte após drenarem os terrenos das rochas cristalinas. Seus afluentes desenvolvem uma rede de drenagem pouco densa, o que sugere reduzidos escoamentos e elevadas taxas de infiltração, o que neste caso, não chega a ocorrer devido às elevadas perdas por evapotranspiração.

Na paisagem regional distinguem-se diferentes formas de relevo associadas aos diferentes tipos litológicos e as estruturas geológicas. No domínio das rochas cristalinas, ao sul da área, predomina um relevo acidentado, composto por alinhamento de serras e morros isolados, desenvolvendo uma rede de drenagem dendrítica e bastante densa. Ao norte da área, tem-se a ocorrência de um relevo típico de chapada (Chapada do Apodi) formada por calcários da Formação Jandaira, com formas bastante planas e suaves variações de cotas. Na área de estudo, constituída por arenitos da Formação Açu, o relevo é predominantemente tabular e suavemente ondulado, com a presença de vales associados às drenagens superficiais. O contato da Formação Açu com os calcários da Formação Jandaira ocorre em grande parte sob a forma de escarpa abrupta.

#### **ESTRUTURA HIDROGEOLÓGICA**

A caracterização da estrutura hidrogeológica do terreno une ferramentas de análise estrutural, da geofísica e da hidrogeologia (Figura 2). O levantamento geofísico-estrutural foi desenvolvido numa escala regional e compreendeu: compilação de mapa geológico em escala 1:200.000 (BRASIL-DNPM, 1988) e interpretação de lineamentos, com base em imagem Landsat; levantamento de dados estruturais do terreno; análise de dados gravimétricos e execução de sondagens elétricas verticais (SEV) e longitudinais (SEL) (MEDEIROS et al., 2001).

Figura 2 – Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar. Trecho Apodi – Upanema  
 Figure 2. The structural framework of the Potiguar Basin



Denota-se no mapa geológico a presença de altos e baixos estruturais (Figuras 3A, 3B e 3C). As principais falhas com rejeitos verticais inferidos a partir dos dados geofísicos (geo-elétricos e gravimetria) e ou poços, situam-se próximas às estruturas que, em subsuperfície, são mapeadas pela PETROBRAS como limites do *graben* central. Embora algumas das anomalias (ou simplesmente “altos” e “baixos”) também possam ser interpretadas como feições associadas a um paleorelevo, a configuração das isogálicas, o contraste entre as sondagens elétricas adjacentes, e os dados do terreno, favorecem uma interpretação estrutural (falhas) na maioria dos casos (MEDEIROS et al., 2001).

As figuras 4 e 5 apresentam iso-linhas de espessura da Formação Açú e de espessuras saturadas do aquífero Açú (Fevereiro/2001), respectivamente, as quais foram obtidas com base nos dados do cadastramento de poços, nos perfis litológicos de poços (Tabela 1), e resultados de sondagens elétricas verticais segundo Medeiros et al. (2001) e sondagens elétricas longitudinais (SANTOS, 1977). Ver Tabela 2. Verifica-se que há um aumento das espessuras do aquífero Açú no sentido de sul (embasamento cristalino) para norte (Formação Jandaíra).

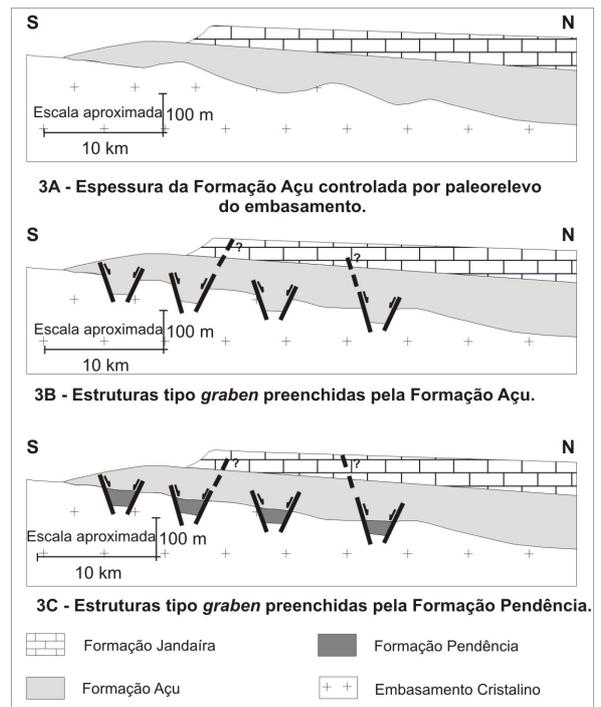


Figura 3. Modelos de condicionamento estrutural-hidrogeológico na borda sudoeste da Bacia Potiguar. Fonte: MEDEIROS et al. 2001.

Figure 3 - The hydrogeologic structural models on the border southwest of the Potiguar Basin. Authors: Medeiros et al. (2001)

A espessura da Formação Açú varia de menos de 10 m na faixa sul da área (próximo ao contato com o embasamento cristalino) a mais de 90 m na faixa norte (em direção aos calcários). A porção centro-norte da área é que desenvolve maiores espessuras, podendo atingir 275 m (sul de Felipe Guerra).

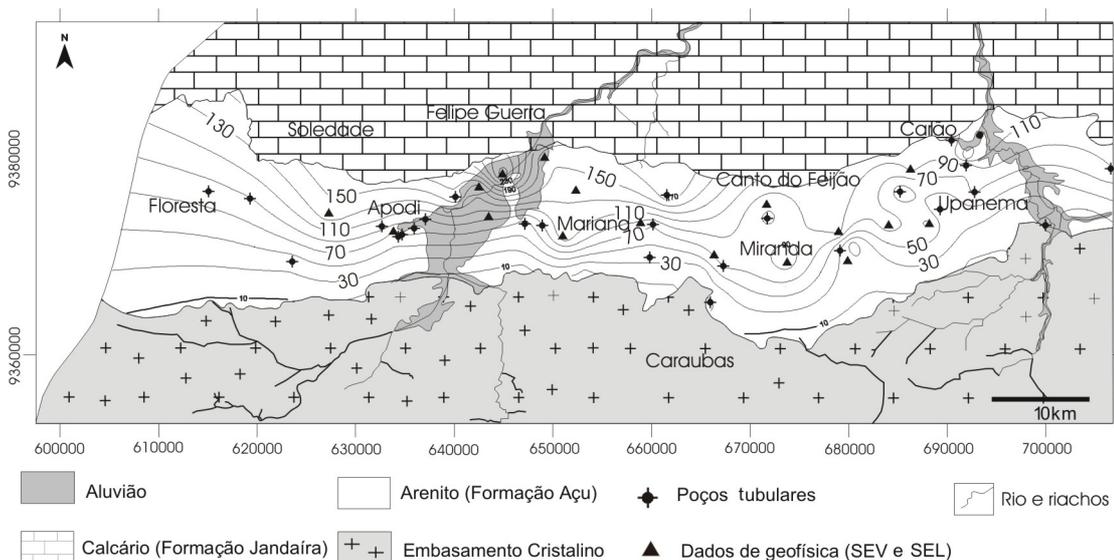


Figura 4. Isolinhas de espessura da Formação Açú.

Figure 4 - Thickness isolines of the Açú Formation

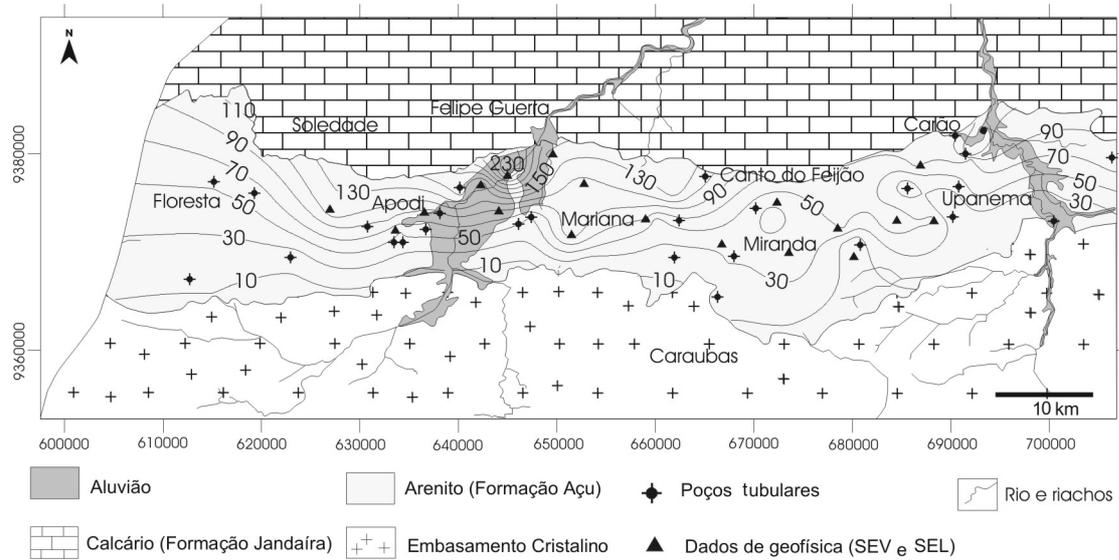


Figura 5. Espessura saturada do Aquífero Açú.  
Figure 5 - Saturated thickness of the Açú Aquifer.

Tabela 1 - Espessuras do aquífero Açú com base nos perfis litológicos  
Table 1 - Thickness of the Açú aquifer obtained by geologic logs

Poço	Localização	Profundidade poço (m)	Nível estático (m)	Espessura penetrada (m)	Espessura saturada penetrada (m)
P - 02*	Missão	93,00	3,00	91,00	89,00
P - 04	Córrego	45,00	20,71	45,00	24,29
P - 05	Córrego	67,00	11,44	67,00	55,56
P - 06	Retiro	70,00	27,02	70,00	42,98
P - 07	Lagoa do Mato	52,00	26,63	52,00	25,37
P - 08	Lagoa do Mato	90,00	29,26	90,00	60,74
P - 09	Lagoa do Mato	60,00	32,20	60,00	27,80
P - 10	Santa Isabel	120,00	38,13	120,00	81,88
P - 11	Saquinho	102,00	38,80	102,00	63,20
P - 12	Pé de Serra	83,00	30,90	83,00	52,10
P - 13	Tabuleiro Grande	126,00	31,49	126,00	94,51
P - 14	Tabuleiro Grande	125,00	39,11	125,00	85,89
P - 15	Tabuleiro Grande	125,00	23,53	125,00	101,47
P - 16	Tabuleiro Grande	118,00	19,68	118,00	98,32
P - 17	Apodí	90,00	28,10	90,00	61,90
P - 18	Apodí	100,00	38,15	100,00	61,85
P - 19	Apodí	98,00	42,40	98,00	55,60
P - 20	Apodí	106,00	30,00	106,00	76,00
P - 21	Apodí	70,00	11,07	70,00	58,93
P - 22	Pequé	66,00	28,96	66,00	37,04
P - 23*	Bico Torto	77,00	7,51	69,00	61,49
P - 24*	Bico Torto	63,00	9,53	60,00	50,47
P - 25	Apodí	95,00	32,60	95,00	62,40
P - 28	Ponta	60,00	24,15	60,00	35,85
P - 36*	Lagoa do Mato	90,00	27,58	87,00	59,42
P - 52*	Urbano	31,00	11,99	30,00	18,01
P - 122	Tabuleiro Grande	95,00	36,35	95,00	58,65
P - 175*	Baixa Fechada	87,00	5,00	63,00	63,00
P - 176*	Baixa fechada	111,30	5,00	82,00	82,00
P - 177	Sítio Trapiá	40,00	3,34	12,00	12,00
P - 178	Sítio Juazeiro	37,00	2,32	2,00	2,00
P - 179*	Sítio Juncal	160,00	2,53	122,00	122,00
P - 180	Sítio Rio Novo	176,00	0,37	142,00	142,00
P - 186	Igarapé	85,00	22,79	85,00	62,21
P - 189	Faz. São João	104,00	19,62	104,00	84,38
P - 205*	Igarapé	80,00	32,60	74,00	41,40
P - 206	Vertente	98,00	59,10	98,00	38,90
P - 209	Igarapé	142,00	26,12	142,00	115,88

continua

continuação

Tabela 1 - Espessuras do aquífero Açu com base nos perfis litológicos

Table 1 - Thickness of the Açu aquifer obtained by geologic logs

Poço	Localização	Profundidade poço (m)	Nível estático (m)	Espessura penetrada (m)	Espessura saturada penetrada (m)
P - 211	Igarapé	120,00	11,70	120,00	108,3
P - 221	Faz. Itaoca II	79,00	14,69	79,00	64,31
P - 222	Faz. Itaoca III	70,00	8,34	70,00	61,66
P - 224	Faz. Itaoca	120,00	11,70	120,00	108,30
P - 227*	Mariana	91,00	21,10	88,00	66,90
P - 229*	Mariana	65,00	16,33	64,00	47,67
P - 232	Santana	92,00	8,04	92,00	83,96
P - 232.1	Santana	112,00	8,18	112,00	103,82
P - 246*	Quadro Cachoeira	42,00	9,84	36,00	26,16
P - 250	Faz. S. J. Arisco	115,00	37,97	115,00	77,03
P - 259	Faz. Dois Irmãos	116,00	58,41	116,00	57,59
P - 268	Km 101	120,00	58,40	120,00	61,60
P - 270	Km 101	92,00	72,69	92,00	19,31
P - 271	Canto do Feijão	100,00	20,65	100,00	79,35
P - 285	Baixa Fechada	100,00	39,67	100,00	60,33
P - 287*	Baixa Fechada	75,00	42,22	72,00	29,78
P - 289	Galho do Angico	120,00	67,80	120,00	52,20
P - 294	Igarapé	111,00	33,50	111,00	77,5
P - 295	Igarapé	107,20	27,86	107,20	79,34
P - 301	Sítio Independ.	82,00	21,14	82,00	60,86
P - 302*	Barroca	95,00	8,66	93,00	84,34
P - 304	Atoleiro	88,00	12,30	88,00	75,70
P - 305	Independência	95,00	13,10	95,00	81,90
P - 310	Cabeça de Boi	80,00	18,23	80,00	61,77
P - 312	Boágua	52,00	13,22	52,00	38,78
P - 319	Carão	100,00	11,58	100,00	88,42
P - 323	Poré	66,00	7,40	66,00	58,60
P - 324	Poré	60,00	10,75	60,00	49,25
P - 326	Poré	60,00	12,39	60,00	47,61
P - 331*	Upanema	74,00	5,00	68,00	63,00
P - 346	Sorocaba	100,00	44,62	100,00	55,38
P - 347	Sorocaba	120,00	35,60	120,00	84,40
P - 355*	Baixa do Tatu	60,00	28,90	35,00	6,60
P - 356	Vermelha	40,00	8,96	40,00	31,04
P - 364*	Olho Da água	51,00	22,57	33,00	10,43
P - 367	Galho de Angico	120,00	66,73	120,00	53,27
P - 370	Baixa do Feijão	100,00	39,52	100,00	60,48
P - 374	Canafistola	90,00	16,00	90,00	74,00
P - 381	Atoleiro	88,00	12,30	88,00	75,70
P - 400	S.B. Vermelha	102,00	20,5	81,50	60,75
P - 401	Livramento II	108,00	13,52	94,48	80,96
P - 403*	Baixa Grande	80,00	47,70	79,00	31,30
P - 404	Canto do Feijão	92,00	51,00	92,00	41,00
P - 4705	Faz. Caraúbas	154,00	13,89	86,00	86,00
P - 407*	Bom Lugar	130,00	10,00	90,00	80,00
P - 415*	Vila Paraibana	54,00	10,00	48,00	38,00
P - 416*	Pedra II	45,00	18,20	45,00	26,80
P - 418*	Upanema	76,00	10,00	75,00	65,00
P - 419	Igarapé	80,00	33,10	80,00	46,90
P - 420	Igarapé	117,00	27,39	117,00	89,61
P - 422	São Lourenço	88,00	10,93	80,00	69,07
P - 423	Faz. R. Pascoal	110,00	8,48	110,00	101,52
P - 424	Miranda	84,00	39,48	84,00	44,52
P - 425	Zona Urbana F.G	135,00	9,03	135,00	125,97
P - 426	Igarapé	101,00	41,75	101,00	59,25
P - 427*	Bela Fonte	76,50	20,5	72,00	51,50
P - P*	Assentamento Caraúbas	300,00	42,0	185,00	143,00

Obs.: \* Poços que atingem o embasamento (espessura total); P: Poços cadastrados;

P - P: Poço PETROBRAS

Tabela 2 – Espessuras do aquífero Açú com base em prospecção geofísica

Table 2. Thickness of the Açú aquifer obtained by geophysical prospection

Ponto	Localização	Nível estático (m)	Espessura (m)	Espessura saturada (m)
SEV 1	Jatobá	17,00	77,00	60,00
SEV 2	Bx. do Feijão	22,00	74,00	52,00
SEV 3	Miranda	32,50	102,00	69,50
SEV 4	Bx. do Tatu	12,00	72,00	60,00
SEV 5	Vermelha	27,50	82,00	54,50
SEV 6	Retiro	4,00	24,00	20,00
SEV 7	Retiro	13,00	98,00	85,00
SEV 8	Pau d'arco	5,00	95,00	90,00
SEV 9	Bico Torto	7,50	60,00	52,50
SEV 10	Largo Apodi	23,50	143,00	119,50
SEV 11	São Lourenço	6,00	132,00	126,00
SEV 12	Paulista	4,75	94,00	89,25
SEV 13	Mato Verde	3,00	153,00	150,00
SEV 14	Ursulina	5,00	125,00	120,00
SEV 15	Aç. Nestor	5,50	135,00	129,50
SEV 16	Cachoeira	19,00	109,00	90,00
SEL 44	Felipe Guerra	15,00	290,00	275,00

Fonte: Medeiros *et al.*, 2001 e Santos (1977).

Obs.: SEV: Sondagem Elétrica Vertical; SEL: Sondagem Elétrica Longitudinal.

O comportamento geral das espessuras saturadas do aquífero Açú é similar (Figura 5), variando de menos de 10 m na faixa sul a mais de 70 m na faixa norte. Tal como ocorre com a espessura total da Formação Açú, a parte central da faixa norte é que desenvolve maiores espessuras saturadas, superiores a 130 m, podendo chegar a 255 m ao sul de Felipe Guerra com base nos dados levantados. A espessura saturada média, no setor norte, é da ordem de 150 m.

Tendo em vista uma melhor visualização e caracterização da estrutura hidrogeológica do terreno, foram elaboradas seções geológicas (figuras 6 a 9) baseadas nos perfis litológicos de poços segundo a direção S-N. Em todas as seções denota-se o aumento das espessuras do aquífero Açú de sul para norte, podendo estas variações estar associadas a falhamentos verticais escalonados, tal como sugerem os estudos geofísicos. A seção da Figura 6 cruza a planície aluvial do Apodi na direção SW – NE, passando próximo a cidade de Apodi até Felipe Guerra. Apenas o poço P-180, com 176 m, não penetra toda a espessura do aquífero Açú. Verifica-se a ocorrência de depósitos aluviais cuja espessura atinge até 35 m, formados por arenitos finos a grossos com intercalações argilosas. Com relação ao aquífero Açú, há um domínio de sedimentos areno-argilosos próximo ao embasamento cristalino mudando para sedimentos finos e grossos, calcíferos, em direção aos calcários da Formação Jandaira, no setor norte. O topo do embasamento cristalino neste setor situa-se a profundidades superiores a 176 m, o que equivale a dizer que a espessura do aquífero Açú é

superior a 140 m, já que os primeiros 36 m são compostos por sedimentos aluvionares.

Na seção da Figura 7, de direção SE-NW, apenas o poço P-23, com 69 m, distanciado de 6 km do limite sul da área, atinge o embasamento cristalino. Nos demais poços, com profundidades que vão de 88 a 126 m, o topo do embasamento não é atingido. Com relação a litologia, há um domínio de sedimentos mais grosseiros na parte mais inferior dos perfis, com a presença de arenitos argilosos nos níveis mais superiores. Na seção geológica da Figura 8 o topo do embasamento cristalino foi atingido a profundidades de 36 e 74 m, a distâncias do limite sul da área de 3 e 8 km, respectivamente. O poço P-209, já próximo dos calcários, com 142 m de profundidade, não atingiu o embasamento rochoso. A correlação litoestratigráfica, neste caso, é muito difícil de ser estabelecida pela grande variação lateral de fácies, o que poderia estar associado a falhamentos ou na pior das hipóteses erros associados a descrição do perfil do poço p-209, o qual exhibe um perfil formado de argilas próximo do poço P-294 cujo perfil encerra arenitos finos a grossos e é de boa produção (60 m<sup>3</sup>/h). A seção geológica da Figura 9 situa-se próxima ao extremo leste da área do projeto, passando próximo a cidade de Upanema. O poço P-331 atingiu o embasamento cristalino a uma profundidade de 68 m e está distanciado de 7 km do limite sul da área. Com relação a litologia, com raras exceções o comportamento é similar as demais seções, com a ocorrência de sedimentos mais grossos nos níveis mais inferiores dos perfis.

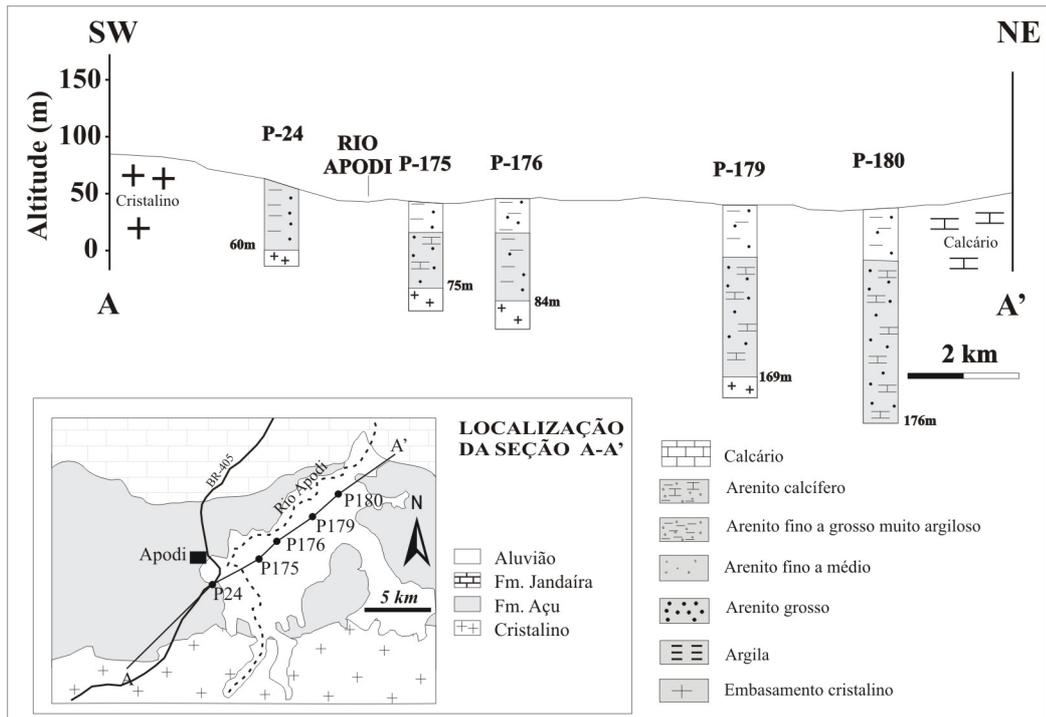


Figura 6. Seção geológica A-A', Área de Apodi.

Figure 6 - Geologic section A-A' (Apodi area).

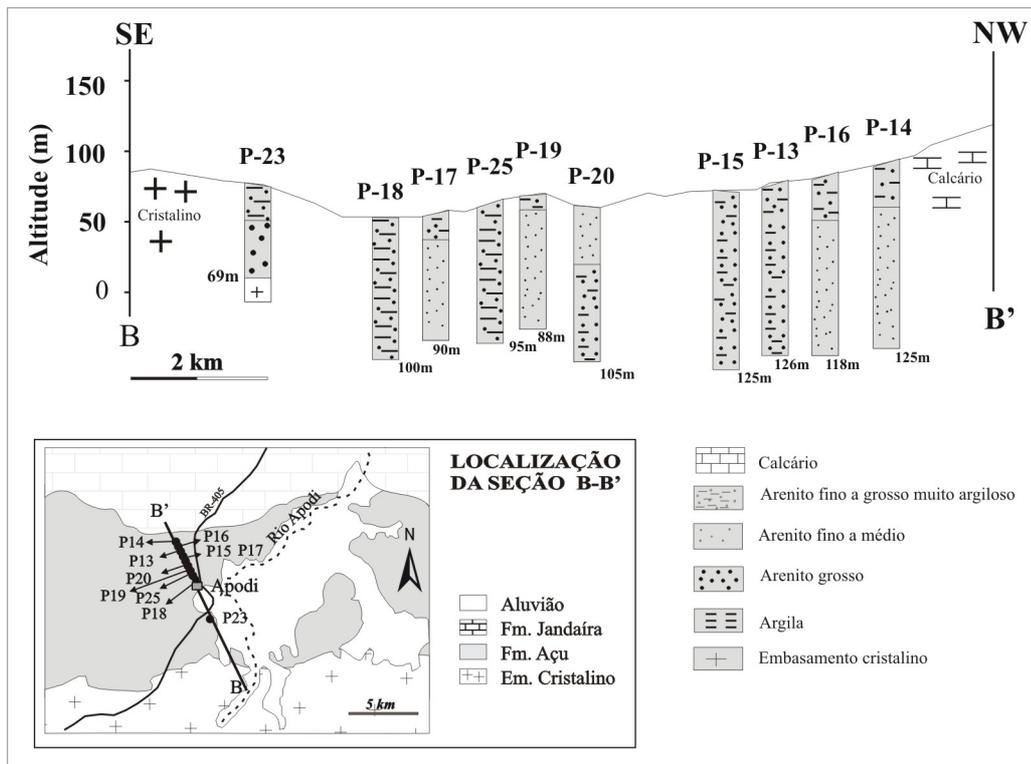


Figura 7. Seção geológica B-B', Área de Apodi.

Figure 7 - Geologic section B-B' (Apodi area).

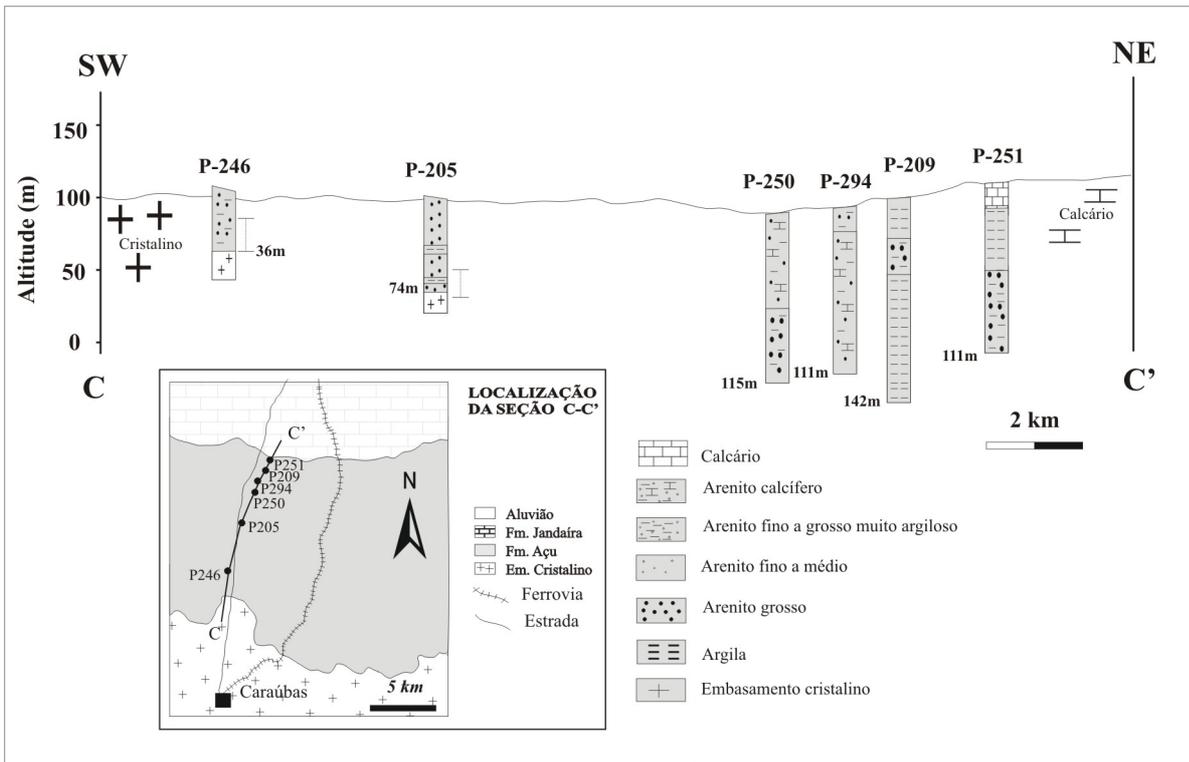


Figura 8. Seção geológica C-C', Área de Caraúbas  
 Figure 8 - Geologic section C-C' (Caraúbas area)

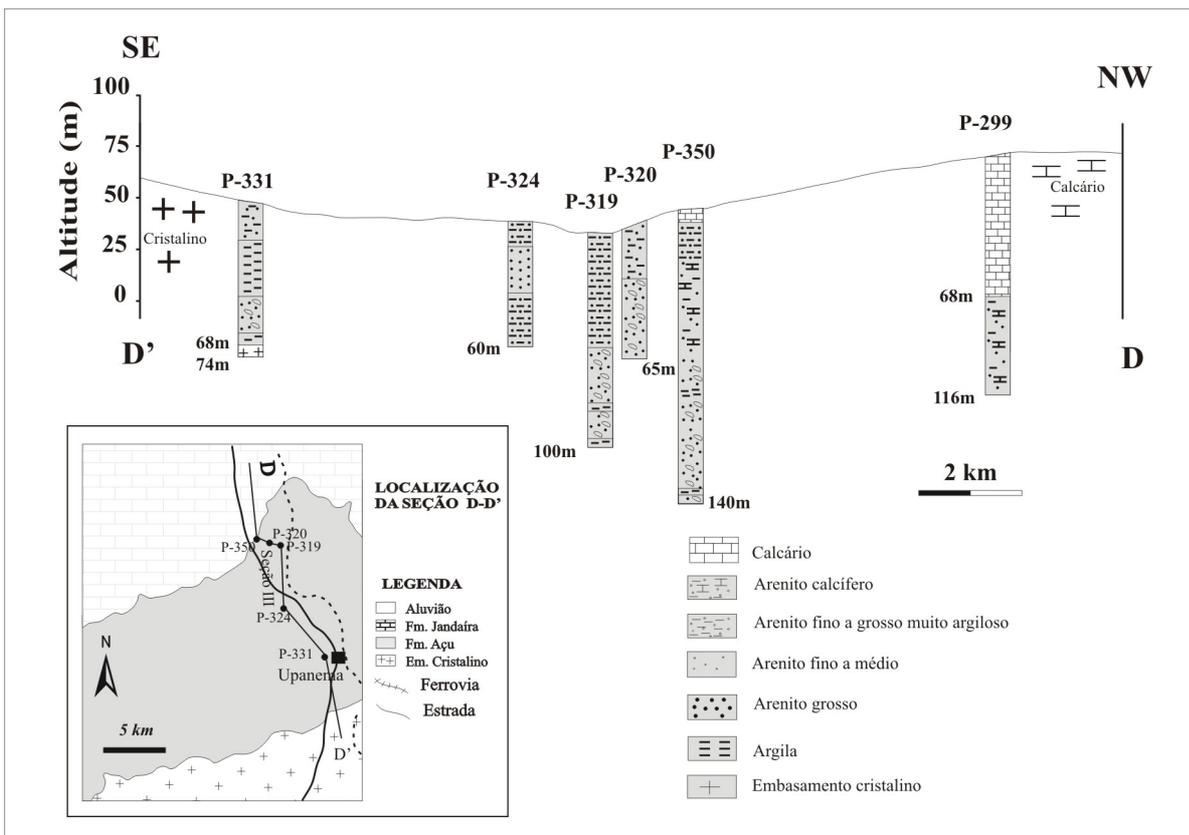


Figura 9. Seção geológica DD'-Área de Upanema.  
 Figure 9 - Geologic section D-D' (Upanema area)

## FLUXO SUBTERRÂNEO E PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

De acordo com a configuração das equipotenciais (Figura 10), a estrutura geológica do terreno condiciona linhas de escoamento subterrâneo em geral orientadas no sentido de sul para norte, partindo do contato com as rochas cristalinas em direção aos domínios dos calcários da Formação Jandaira. Verificam-se ocasionalmente inflexões das linhas de escoamento para nordeste e noroeste em direção aos vales dos rios principais que drenam a área (rios Apodi e do Carmo).

As águas subterrâneas escoam na faixa sul da área com gradientes hidráulicos relativamente elevados, superiores a 1%, enquanto que na faixa norte, contígua aos calcários, os gradientes são mais baixos, da ordem de 0,2%, sugerindo melhores condições hidrogeológicas neste setor, o que na região da Planície do Apodi pode estar associado também a recarga propiciada pelo aquífero aluvial em direção ao aquífero Açú por drenança vertical descendente.

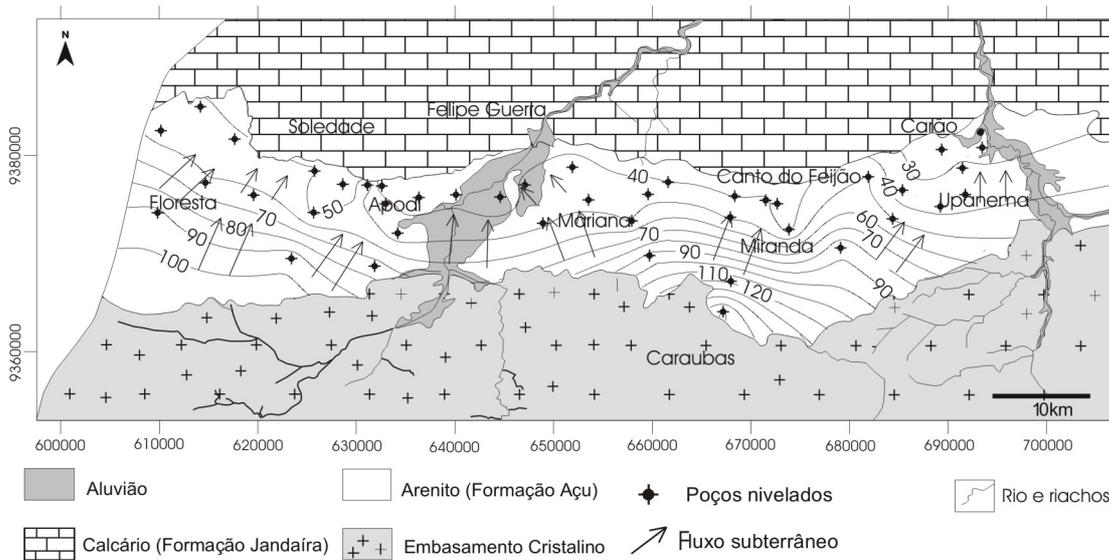


Figura 10. Potenciometria do aquífero Açú.

Figure 10 - Potentiometric contour of the Açú Aquifer.

Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Açú foram avaliados a partir da interpretação dos resultados de 41 testes de bombeamento em poços de produção (Tabela 3), cujos ensaios

tiveram uma duração de no máximo 24 horas, com observação da recuperação dos níveis da água depois de encerrado os bombeamentos.

Tabela 3 - Resumo do resultado dos testes de bombeamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos:

Table 3. Summary of the pumping tests results and the hydrodynamics parameters.

	Poço	Prof. (m)	tb (h)	NE (m)	ND (m)	s (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)
ÁREA DE APODI	15	-	10	24,7	36,5	11,8	68,7	194,4	2,5
	16	118	12	19,7	42,3	22,6	63,7	168,5	2,1
	28	60	12	21,7	28,4	6,7	7,00	33,9	1,0
	400	102	12	20,5	30,0	9,5	3,3	6,0	0,1
	421	84	8	8,5	17,7	9,2	26,7	199,6	2,9
	422	77,5	12	10,9	15,0	4,1	7,4	63,5	1,2
	423	110	8	8,5	21,5	13,0	11,2	11,4	3,3
	425	130	24	9,0	22,7	13,7	16,0	74,6	0,8
ÁREA DE CARAÚBAS	427	77	12	20,7	33,6	12,9	8,5	20,0	0,4
	182	96	6	20,3	26,6	6,3	4,8	5,3	0,1
	186	85	12	24,0	44,5	20,5	21,9	8,6	0,1
	205	80	6	32,0	56,2	24,2	2,5	1,1	0,04
	209	142	8	29,9	42,0	12,1	8,7	19,2	0,8
	232	92	12	9,3	20,6	11,3	10,8	20,7	0,4
	232.1	112	12	10,6	45,8	35,2	20,3	18,8	0,3
	250	115	12	39,9	50,8	10,9	26,2	84,0	1,7
	265	116	12	63,8	65,8	2,0	1,5	11,4	0,2
	270	92	12	51,0	63,8	12,8	3,5	4,0	0,1
	285	100	24	40,5	49,3	8,8	30,0	170,2	3,7
	294	111	12	29,2	44,3	15,1	36,0	115,7	1,6
	295	112	12	22,9	36,3	13,4	37,0	128,7	1,8
	401	108	12	13,5	27,7	14,2	7,0	12,1	-
	403	80	12	47,7	62,1	14,4	0,4	0,9	0,03
	404	92	12	51,0	63,3	12,3	3,4	3,9	0,1
	419	80	9	33,2	47,3	14,1	13,3	29,6	0,8
	420	115	18	27,4	30,5	3,1	6,7	129,6	1,6
424	84	12	39,5	43,9	4,4	3,6	16,4	0,6	
428	85	12	21,2	27,0	5,8	6,5	18,1	0,3	
ÁREA DE UPANEMA	429	-	12	42,1	44,5	2,4	26,2	99,4	2,5
	302	95	12	8,7	20,0	11,3	15,4	113,2	1,7
	318	-	12	5,8	6,2	0,4	12,9	114,0	1,3
	319	100	12	5,3	36,0	30,7	25,7	82,4	1,0
	326	60	11	11,4	23,5	12,1	5,6	14,4	0,3
	345	84	10	35,7	45,9	10,2	3,45	61,2	1,4
	346	100	24	44,6	50,9	6,3	4,5	8,4	0,3
	347	120	24	35,3	37,9	2,6	9,0	89,0	2,2
	350	142	8	15,0	16,7	1,7	9,1	140,8	1,3
	356	40	24	4,00	24,9	20,9	1,7	0,9	-
	370	100	24	40,5	49,3	8,8	30,0	165,9	3,5
	387	-	12	9,5	12,3	2,8	12,9	140,8	1,6
392	52	12	13,2	20,3	7,1	5,8	18,3	0,5	

tb: tempo de bombeamento ; s: rebaixamento; T: transmissividade; NE: nível estático ; Q: vazão; K: condutividade hidráulica; ND: nível dinâmico

Os locais dos ensaios não estão distribuídos regularmente, o que seria o desejável; como também áreas importantes do ponto vista hidrogeológico não foram testadas. Apesar destas limitações, os ensaios permitiram boas estimativas da transmissividade e da condutividade hidráulica. A porosidade efetiva não chegou a ser avaliada, já que o único teste de bombeamento com dispositivo de poço de observação realizado teve curta duração e não

ficou caracterizado o fenômeno de drenagem retardada na curva de rebaixamento com o tempo. Os testes foram interpretados pela aplicação dos métodos de Cooper & Jacob para rebaixamento e Jacob-Theis para os dados de recuperação. Na maioria dos casos, a correção de Jacob para aquíferos livres foi aplicada aos dados de rebaixamento. A distribuição espacial da transmissividade é apresentada na Figura 11, na qual pode se observar que a transmissividade

crece no sentido de sul para norte na direção do fluxo subterrâneo, atingindo os valores mais elevados próximo ao contato com os calcários. No setor sul da área a transmissividade é inferior a 10 m<sup>2</sup>/d e no setor norte este parâmetro atinge valores superiores a 170 m<sup>2</sup>/d (oeste de Felipe Guerra).

A condutividade hidráulica tem um comportamento similar a transmissividade, ou seja, cresce no sentido de sul para norte. Na faixa meridional da área o aquífero Açú apresenta valores de condutividade hidráulica inferior a 0,2

m/d, enquanto que na sua faixa setentrional este parâmetro assume valores em média de 1,86 m/d.

Os valores de transmissividade do setor norte da área foram obtidos com base em resultados de testes de bombeamento em poços com penetração parcial no aquífero Açú. Para condições de penetração total, tomando por base a espessura saturada média de 150 m (obtida com base em sondagens mecânicas e sondagens geofísicas) e a condutividade hidráulica média de 1,86 m/d, verifica-se que a transmissividade do aquífero Açú pode atingir valores estimados da ordem de 280 m<sup>2</sup>/d, em média.

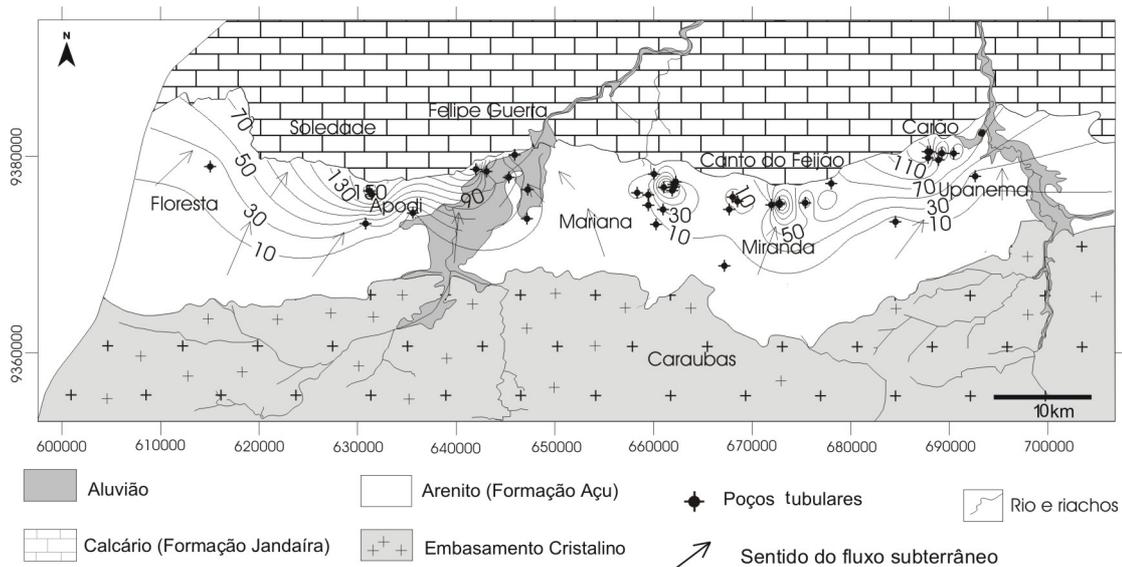


Figura 11. Transmissividade do aquífero Açú.

Figure 11 - Transmissivity of the Açú aquifer.

## RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A recarga das águas subterrâneas pode ser definida no senso geral como o fluxo de água descendente que alcança o nível da água de um aquífero livre, formando uma reserva de água adicional para as águas subterrâneas. A quantificação da recarga das águas subterrâneas é um pré-requisito básico para um eficiente manejo dos recursos de águas subterrâneas, e é particularmente vital em regiões semi-áridas onde tais recursos são freqüentemente a chave do desenvolvimento econômico. Nestas condições, em regiões semi-áridas a necessidade de estimativa de uma recarga confiável é fundamental (SIMMERS, 1997). Este parâmetro é, entretanto, muito difícil de ser avaliado principalmente em regiões semi-áridas (LERNER et. al., 1990; SIMMERS et al., 1997; LERNER, 1997; HEALY; COOK, 2002; SANFORD, 2002 e VRIES; SIMMERS, 2002). A recarga das águas subterrâneas pode ocorrer naturalmente das precipitações, rios, canais e como um fenômeno induzido pelo homem

através de atividades de irrigação e de urbanização. A maioria das técnicas de avaliação de recarga em meio insaturado fornece estimativas pontuais, enquanto que as técnicas na zona saturada comumente integram áreas muito mais extensas. Ainda, enquanto as abordagens na zona insaturada fornecem estimativas potenciais da recarga, as abordagens na zona saturada fornecem evidências da recarga real porque a água alcança o nível da água (SCANLON; COOK, 2002). Devido as incertezas associadas com as técnicas para a estimativa da recarga, o uso de diferentes métodos é recomendado para que se possa comparar resultados e se chegar a um número mais confiável.

Na área de estudo a recarga das águas subterrâneas se processa principalmente pelas infiltrações diretas das águas de precipitação pluviométrica no terreno. Em menor escala, a recarga pode ocorrer no leito dos rios através dos aluviões. O processo de recarga em geral é dificultado pelas condições de aridez da área, que lhe atribui “déficit” hídrico expressivo; pelo

caráter areno-argiloso da parte superior da Formação Açú e pela elevada profundidade do nível das águas subterrâneas na maior parte dos casos (Figura 12). Sabe-se que em situações similares de litologia do meio poroso insaturado, quanto maior a profundidade do nível freático maior será o tempo de trânsito das águas de infiltração às águas subterrâneas, o que, por conseguinte, pode influenciar na recarga efetiva. A profundidade do nível das águas subterrâneas

em grande parte da área é superior a 30 m, chegando a 110 m no seu extremo Noroeste. Os níveis das águas subterrâneas próximas ao contato com o embasamento cristalino e no domínio das planícies aluviais, entretanto, são inferiores a 10 m.

No presente trabalho foram aplicadas diferentes metodologias na avaliação da recarga das águas subterrâneas, conforme apresentado a seguir e sintetizado na Tabela 4.

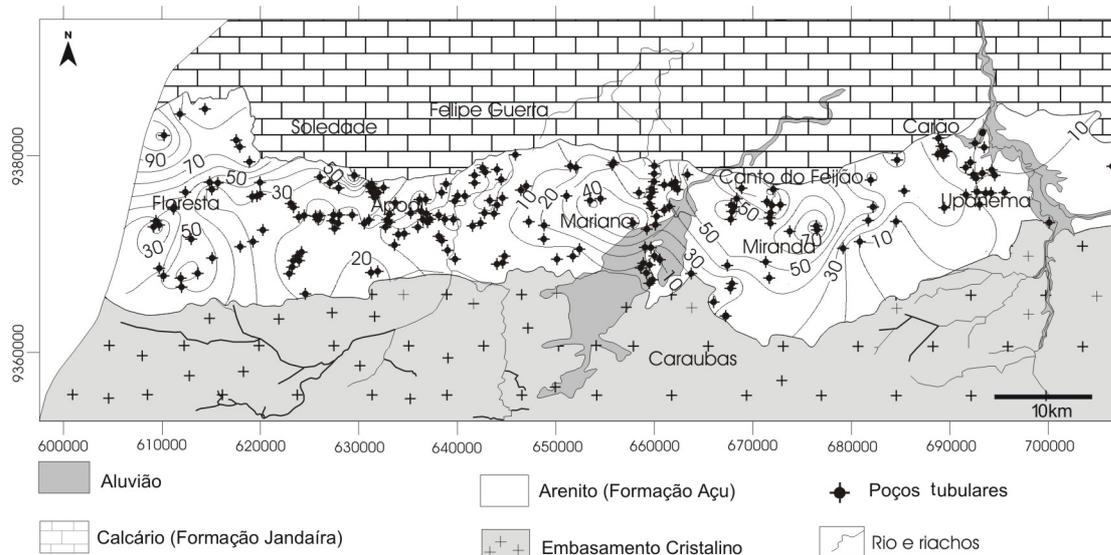


Figura 12. Profundidade do nível das águas subterrâneas.

Figure 12 - Groundwater level depth.

### Balanco hidroclimatológico

O método do balanço hidroclimatológico é um procedimento elementar que pode fornecer uma primeira indicação potencial sobre o montante da recarga das águas subterrâneas. A equação geral do balanço hídrico estabelece que:

$$P = E + R + I \quad (1)$$

Onde  $P$  é a precipitação (mm);  $E$  é a evapotranspiração real (mm);  $R$  é o escoamento superficial (mm) e  $I$  é a infiltração (mm).

O excedente anual de água no solo de precipitação ( $R + I$ ) pode corresponder à lâmina de água infiltrada no terreno (CASTANY, 1975; FETTER, 1994). O excedente de água de precipitação obtida no balanço hídrico foi de 47,6 mm, o qual pode corresponder à recarga das águas subterrâneas na área de estudo. Considerando que a precipitação pluviométrica média anual na área é de 765 mm, a taxa de infiltração correspondente é de 6,20%. O volume de água anual infiltrado em termos potenciais pode chegar a  $62,83 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

### Aplicação da Ley de Darcy

Em aquíferos livres, como é o caso do aquífero Açú, suas potencialidades estão

condicionadas principalmente as infiltrações diretas das águas de chuva, cujo volume efetivamente infiltrado restitui as reservas de águas subterrâneas que se perdem nos escoamentos naturais e exploração por poços e, também, alimentam o fluxo subterrâneo. Por definição, em condições de equilíbrio, sem considerar a exploração por poços, a infiltração eficaz é equivalente a vazão do fluxo subterrâneo natural. A descarga do fluxo subterrâneo natural em direção à região dos calcários, obtida a partir do mapa potenciométrico (Figura 10), foi de  $1,688 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que equivale a  $50,64 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , que em termos de lâmina de água corresponde a 38 mm. A equação utilizada foi:

$$Q = TIL \quad (2)$$

Onde  $Q$  é a vazão do fluxo subterrâneo ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $T$  é a transmissividade ( $\text{m}^2/\text{s}$ ); e  $L$  é a frente de escoamento (km).

Nas avaliações foi considerado um valor médio de transmissividade de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , obtido a partir da condutividade hidráulica média de  $2,31 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  e espessura saturada de 130 m do aquífero Açú na faixa contígua aos calcários. A vazão do fluxo subterrâneo foi avaliada para uma

condição no qual o aquífero estava sendo explorado, e assim sendo, o montante correspondente a

esta exploração deve ser considerado na recarga anual, o que corresponde a  $8,0 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano (equivalente a 6 mm/anos). A recarga de água subterrânea, neste caso, será o somatório da vazão de fluxo obtida com o correspondente volume anual explorado, ou seja,  $58,64 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano ou 44 mm de lâmina de água infiltrada. A taxa de infiltração, portanto é da ordem de 5,7%, tomando por base a precipitação pluviométrica média de 765,10 mm/ano.

#### Flutuação sazonal do nível da água

O método da flutuação do nível da água é baseado na premissa de que a elevação do nível da água subterrânea em aquíferos livres é devido a água de recarga que chega ao aquífero. A recarga é calculada como:

$$R = S_y(dh/dt) = S_y(\Delta h/\Delta t) \quad (3)$$

Onde  $S_y$  é a porosidade específica (adm);  $h$  é a altura do nível da água (mm), e  $t$  é o tempo (s).

O método da flutuação de nível da água tem sido usado em vários estudos (RASMUSSEN; ANDREASEN, 1959; GERHARD, 1986; HALL; RISSER, 1993) e descrita em detalhe por HEALY; COOK (2002). As dificuldades de aplicação do método é atribuída em geral a falta de um conhecimento mais preciso da porosidade efetiva do material aquífero sujeito a variação sazonal, o qual não foi avaliado no presente trabalho. Quanto a variação do nível da água, as observações efetuadas não foram suficientes para uma caracterização adequada de  $\Delta h$ ,

impossibilitando, portanto a aplicação do método da flutuação do nível da água.

#### Balço de cloreto

A recarga das águas subterrâneas pode ser avaliada de forma aproximada pelo método do balanço do íon cloreto, o qual pode ser estabelecido pela equação:

$$IC_i = PC_p, \text{ ou seja, } I = PC_p / C_i \quad (4)$$

Onde  $I$  é a lâmina de água infiltrada (mm/ano);  $C_i$  é a concentração de cloreto nas águas subterrâneas (mg/L);  $P$  é a precipitação pluviométrica (mm/ano); e  $C_p$  é a concentração de cloreto na água de chuva (mg/L).

Esse método baseia-se no fato de que o íon cloreto é conservativo e não sofre modificações durante a infiltração. Os resultados do balanço do íon cloreto são bons em zonas áridas e zonas arenosas, porém não tanto em zonas úmidas ou com elevado escoamento superficial (CUSTÓDIO, 1973 e CUSTÓDIO; LLAMAS, 1976). A concentração de cloreto nas águas subterrâneas do aquífero Açú, considerada para efeito de cálculo, corresponde ao valor representativo da faixa norte da área onde as águas estão mais diluídas e menos afetadas por processos de salinização, cujo teor de cloreto é de 50 mg/L; no caso das águas de chuva, foi tomado o valor médio de 2,53 mg/L. Desde que a precipitação pluviométrica na área é de 765,1 mm/ ano, aplicando a equação do balanço de cloreto resulta uma lâmina de água infiltrada de 38,71 mm, que corresponde a uma taxa de infiltração de 5,06%.

Tabela 4. Recarga das águas subterrâneas

Tabela 4. Groundwater recharge

Método	Balanço Hídrico	Lei de Darcy	Balanço de cloreto
Lâmina de água infiltrada (mm/ano)	47,60	44,00	38,71
Taxa de infiltração (%)	6,20	5,70	5,06
Volume infiltrado (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano)	62,83	58,64	51,08

A recarga das águas subterrâneas do aquífero Açú a ser considerada neste trabalho corresponde à média obtida pela aplicação da Lei de Darcy e pelo Balanço de cloreto, ou seja, é da ordem de 41 mm/ ano ou 54 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Portanto, não foi considerado o método do balanço hidroclimatológico o qual fornece apenas uma indicação potencial da recarga.

#### CONDIÇÕES DE EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Em regiões semi-áridas com precipitações pluviométricas da ordem de grandeza de 800 mm anuais, as lâminas de água infiltradas atingindo as águas subterrâneas em aquíferos livres à semi-confinados são em geral consideradas superiores a 40 mm (FOSTER et al., 1994; SIMMERS, 1997). Assim sendo, as estimativas feitas no âmbito deste trabalho para o aquífero são

aceitáveis. Em função desses resultados, admitindo condições de equilíbrio, ou seja, sem exploração das águas por poços, os recursos exploráveis poderiam ser, em uma primeira aproximação, teoricamente tomados como equivalentes à recarga anual. Isto, entretanto, deve ser tomado com certa reserva, haja vista a ocorrência de águas salinizadas principalmente no setor sul da área, o que limita desta feita o uso das águas subterrâneas. Existem vários fatores que provavelmente podem estar contribuindo com a salinização das águas neste setor: a) influência das rochas do embasamento cristalino que limitam o setor sul da área, b) baixa transmissividade do aquífero; c) baixa profundidade do nível das águas subterrâneas e d) direção do fluxo das águas subterrâneas no seu sentido de sul para norte. Ressalta-se, entretanto que maiores considerações a cerca da salinização e qualidade das águas não são considerados neste artigo.

A integração geral dos resultados dos estudos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos levam à caracterização de subáreas ou zonas com diferentes possibilidades quanto aos recursos exploráveis, que em termos potenciais são apresentados a seguir (Figura 13):

**Zona A:** Localiza-se no setor norte da área e corresponde a zona de maior potencial hidrogeológico. O aquífero Açú desenvolve espessura saturada em média de 150 m e transmissividade de 280 m<sup>2</sup>/d. Os poços neste domínio, com profundidade em média de 160 m, podem produzir até 100 m<sup>3</sup>/h.

**Zona B:** É contígua a Zona A e de potencial hidrogeológico médio. A espessura saturada é da ordem de 50 m e a transmissividade do aquífero é de 100 m<sup>2</sup>/d. Os poços nesta zona com profundidades da ordem de 120 m podem produzir até 50 m<sup>3</sup>/h.

**Zona C:** Situa-se no setor sul da área e é a zona que apresenta potencial hidrogeológico mais baixo. O aquífero desenvolve espessura saturada de menos de 10 m até 50 m, e a transmissividade é em geral inferior a 10 m<sup>2</sup>/d. A produtividade de poços com 70 m de profundidade, é de no máximo 10 m<sup>3</sup>/h.

Da análise empreendida e de acordo com a Figura 13, verifica-se que quase 50% da área de estudo (660 km<sup>2</sup>) apresenta limitações quanto a ocorrência e a exploração das águas subterrâneas por problemas lito-estruturais que limitam as espessuras saturadas dos aquíferos Açú, tal como se verifica no setor sul da área.

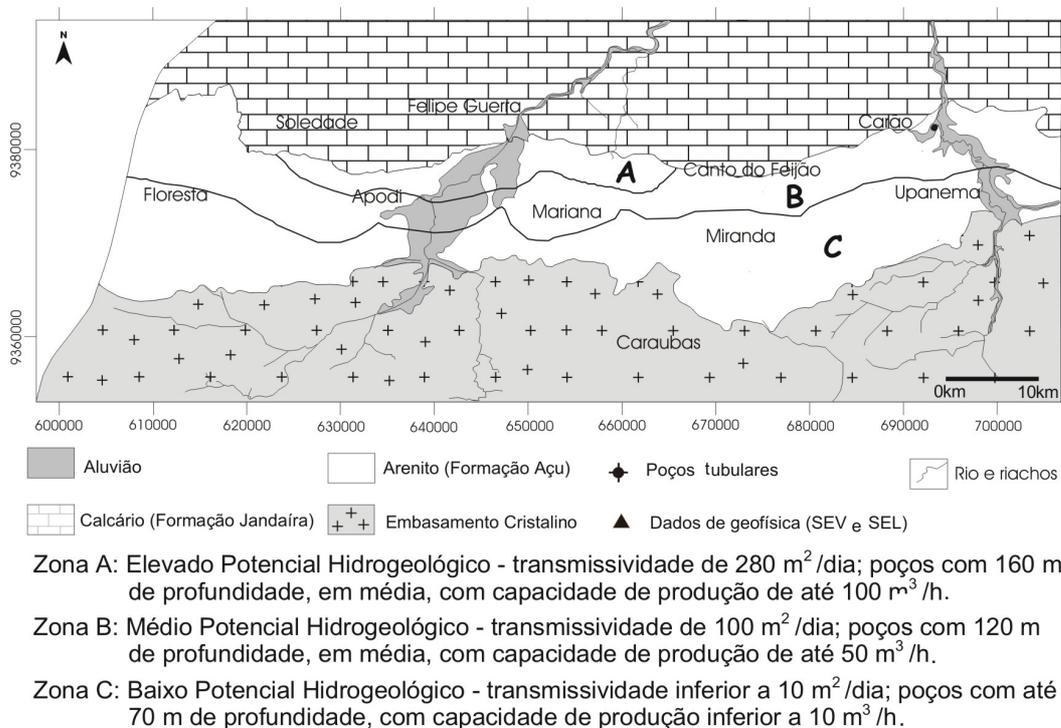


Figura 13. Potencialidades hidrogeológicas do aquífero Açú  
 Figure 13 - Hydrogeologic potentialities of the Açú aquifer

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os aspectos lito-estruturais da Formação Açú, no domínio da área de estudo, condicionam a ocorrência de um aquífero livre sujeito a semi-confinamentos localizados, com diferentes comportamentos quanto a recarga e suas potencialidades. De conformidade com as dimensões, transmissividades e condições de recarga do aquífero Açú, a maior parte das águas armazenadas no mesmo estão concentradas na faixa norte da área.

O volume de água que é disponibilizado atualmente à população é da ordem de 10 milhões de m<sup>3</sup>/ano, o que representa menos de 20% da recarga anual (54 milhões de m<sup>3</sup>). Nestas condições, fica caracterizada a possibilidade de manutenção das descargas atuais que estão sendo captadas no aquífero Açú e também a ampliação da oferta de água, que pode chegar a 40 milhões de m<sup>3</sup>/ano. A preocupação neste caso está associada ao manejo do uso dessas águas, o qual requer poços criteriosamente locados, projetados e explorados de forma que não haja riscos de super exploração, salinização e ou outras formas que possam afetar os recursos e poços de

captação. Neste sentido são feitas a seguir recomendações visando a melhoria do conhecimento do aquífero Açú e uso racional dos seus recursos hídricos:

- Monitoramento dos níveis, das descargas bombeadas e da qualidade das águas o que permitirá avaliar periodicamente a eficiência das captações;
- Execução de sondagens de reconhecimento lito-estratigráfico na faixa norte da área;
- Execução de estudos geofísicos de detalhe em áreas específicas;
- Elaboração de teste de aquífero de longa duração para avaliação da porosidade efetiva do aquífero Açú.

Os resultados a serem obtidos com esses estudos complementares deverão levar a uma avaliação mais precisa das dimensões, parâmetros hidrodinâmicos e condições de exploração do aquífero Açú, bem como a definição de estratégias de manejo que venham a assegurar o uso sustentável do aquífero.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL-DNPM, **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte, escala 1:500.000**; DNPM, UFRN, PETROBRAS, CRM, 1998.
- CASTANY, G. **Prospeccion y explotación de las águas subterráneas**. Barcelona: Omega, 1975.
- CUSTODIO, E. **Estudio de los recursos de aguas subterráneas en la cuenca de la Riera de Carme e área de Capellades: alrededores de Igualada (Barcelona)**. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Serviço Geológico de Obras Públicas, Barcelona, 1973.
- CUSTODIO, E; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterránea**. Barcelona: Omega, 2ed, Tomo I e II. 1976.
- FETTER, C. W., **Applied Hydrogeology**. 3ª ed., Upper Saddle River: Prentice-Hall
- FOSTER, S.S.D., MORRIS, B.L., LAWRENCE, A. R., Effects of urbanization on groundwater recharge. In: ICE Int Conf on Groundwater problems in Urban Areas, London, **Proceedings...** pp43-63, 1994..
- GERHART, J. M., Groundwater recharge and its effect on nitrate concentrations beneath a manures field site in Pennsylvania. **Groundwater** 24:483-489, 1986.
- HALL, D. W.; RISSER, D. W., Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster country, Pennsylvania. **Water Resour Bull** 29:55-76, 1993.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge**. **Hydrogeologic J** DOI 10.1007/s10040-001-0178-0. 2002.
- IPT, **Estudo hidrogeológico regional do Estado do Rio Grande do Norte**, São Paulo, IPT/SIC (Relatório 15.795 – volume 1), 1982.
- LERNER, D. N. **Groundwater recharge**. In: Saether OM, de Caritat P (eds) **Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments**. AA Balkema, Rotterdam, pp 109-150. 1997.
- LERNER, D.N., ISSAR, A.S., SIMMERS, I. **Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge**. IAH Int Contrib Hydrogeolog 8. Heinz Heise, Hannover, 345 pp. 1990.
- MANUEL FILHO, J. M., **Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste**. Folha 10, Jaguaribe, NE. SUDENE, DD, Série Hidrogeologia n° 30, Recife. 1971.
- MEDEIROS, W.E; DE SÁ, F.J. MEDEIROS, V.C.; LUCENA, L.R.F., **Estrutura geológica do aquífero Açú na borda sul da Bacia Potiguar entre Apodi e Upanema, RN**. Convênio CAERN/FUNPEC/UFRN. Relatório Técnico. 2001.
- RASMUSSEN, W.C.; ANDREASEN, G.E. **Hydrologic budget of the Beaverdam Creek Basin, Maryland**. US Geol Surv Water –Supply Pap 1472: 106 p. 1959.
- REBOUÇAS, A.C., Bacia Potiguar. **Estudo Hidrogeológico**. In: Bacia Escola de Hidrogeologia, Recife,
- SUDENE/DD. (Série Hidrogeologia n° 15). Relatório Interno, 1967.
- SANFORD, W., Recharge and groundwater models: an overview. **Hydrogeology Journal** 10: DOI 10.1007/s10040-001-0173-5, 2002.
- SANTOS, M. V., **Estudo hidrogeológico da Planície Aluvial do Apodi, RN**. Economicidade de poços para a irrigação, Recife, SUDENE/UFPE, 185p. 1977.
- SCANLON, B. R., COOK, P. G., **Theme issue on groundwater recharge**. Hydrogeologic Journal DOI 10.1007/s10040-001-0175-3. 2002.
- SCANLON, B. R., HEALY, R. W.; COOK, P. G., **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. Hydrogeology Journal DOI 10.1007/s10040-001-0176-2. 2002.
- SIMMERS, I, HENDRICKX, J. M. C., KRUSEMAN, G. P., RUSHTON, K. R., **Recharge of phreatic aquifers in (semi)arid areas**. IAH Int Contrib Hydrogeolog 19, AA Balkema, Rotterdam, 277 pp. 1997.
- VRIES, J.J.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: an overview of processes and challenges**. Hydrogeology Journal 10: DOI 10.1007/s10040-001-0171-7, 2002.