

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE UM AQUÍFERO CONFINADO ATRAVÉS DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Marcondes Loureiro de Carvalho Batista¹; Janiro Costa Rego², Márcia Maria Rios Ribeiro³ &
José do Patrocínio Tomaz Albuquerque⁴

RESUMO--- A compreensão do fluxo subterrâneo torna-se fundamental para entendimento do sistema hidrogeológico, uma vez que serão analisadas a circulação, a recarga e a descarga do sistema. Nesse contexto, a determinação das propriedades hidráulicas do aquífero é uma etapa relevante para a compreensão das características do sistema. Neste artigo, obtêm-se os parâmetros hidrodinâmicos para um aquífero confinado a partir de dados de cargas hidráulicas observadas em campo, utilizando-se de um modelo matemático. Os resultados mostram que a área de estudo se apresenta com parâmetros hidrodinâmicos heterogêneos e que à medida que forem inseridos mais dados no modelo matemático devem ser realizadas novas calibrações para determinação dos parâmetros.

ABSTRACT--- The understanding of groundwater flow is fundamental to understanding the hydrogeological system, considering its circulation, recharge and discharge system. In this context, the determination of hydraulic properties of the aquifer is an important stage in understanding the characteristics of the system. In this paper, obtain the hydrodynamic parameters for a confined aquifer data from hydraulic heads observed in the field, using a mathematical model. The results show that the study area presents with heterogeneous hydrodynamic parameters and as more data enters in the mathematical model a new calibration for the determination of the parameters will be performed.

PALAVRAS-CHAVE: modelo matemático, fluxo subterrâneo e parâmetros hidrodinâmicos.

¹ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande. Caixa Postal 505, CEP: 58429-140. Campina Grande - PB. Fone (83) 3310-1422. marcondesloureiro@gmail.com.

² Professor do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais(CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande. Caixa Postal 505, CEP: 58429-140. Campina Grande – PB. Fone (83) 3310-1350. janiro@dec.ufcg.edu.br.

³ Professora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental(PPGECA). Universidade Federal de Campina Grande. Caixa Postal 505, CEP: 58429-140. Campina Grande – PB. Fone (83) 3310-1085. mm-ribeiro@uol.com.br.

⁴ Professor Aposentado do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande. Caixa Postal 505, CEP: 58429-140. Campina Grande – PB. Fone (83) 3310-1037. patrociniotomaz@uol.com.br.

1. INTRODUÇÃO

Os aspectos quantitativos e qualitativos da água no planeta têm sofrido variadas alterações motivadas pela intensificação das ações humanas, ocorrendo, em alguns locais, o desaparecimento das nascentes de água e a poluição dos mananciais, entre outras consequências. O conhecimento das características dos recursos hídricos permitirá aos tomadores de decisão uma maior confiabilidade quanto à defesa e exploração racional desses recursos.

Com relação às águas subterrâneas, a compreensão do fluxo subterrâneo torna-se fundamental para o entendimento de um sistema aquífero, uma vez considerada a recarga, circulação e a descarga nesse sistema. Nesse contexto, a determinação das propriedades hidráulicas dos aquíferos é uma etapa relevante para o bom resultado dos estudos hidrológicos.

As propriedades hidráulicas são obtidas a partir de testes de bombeamento de poços, porém é inviável economicamente estabelecer essas propriedades através dos testes de bombeamento para áreas extensas. O que se tem utilizado em várias pesquisas é a determinação dessas propriedades por meio da aplicação de modelos matemáticos, os quais permitem, a partir da equação diferencial do fluxo subterrâneo, a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos.

Este artigo apresenta um exemplo de utilização de modelos matemáticos, para a determinação das propriedades hidráulicas de um aquífero confinado, situado no estado da Paraíba. O estudo, que teve por base um reduzido número de dados de carga hidráulica observada, além de recentes levantamentos geológicos, propõe e aplica soluções específicas para suprir a deficiência de dados para a modelagem, destacando-se o estabelecimento das condições de contorno da área modelada.

2. FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E O APLICATIVO MATEMÁTICO

Com base na Lei da Conservação da Massa (Equação da Continuidade) e na Lei de Darcy, a equação que rege o fluxo subterrâneo, em um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, pode ser representado da seguinte forma (Equação 1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (1)$$

Sendo:

h = carga hidráulica [L];

k_x , k_y e k_z = condutividade hidráulica ao longo dos eixos x , y e z , respectivamente [L/T];

S_s = Armazenamento Específico [1/L];

t = tempo;

W= representa fontes ou sumidouros de água [L³/T].

A equação do fluxo subterrâneo é, portanto, uma equação diferencial parcial. Para a obtenção de sua solução utilizam-se métodos numéricos, convenientemente apresentados em programas computacionais.

Nesse artigo foi utilizado o programa MODFLOW (McDONALD e HARBAUGH, 1988) contido no pacote PMWIN (Processing Modflow for Windows- versão 7.0), que utiliza uma grade de diferenças finitas, onde o nó da célula, ou seja, o ponto onde o valor de um dado ou informação é posicionado está localizado no centro da célula, sendo por isso, chamado de diferenças finitas centrada no bloco. O aplicativo simula o fluxo tridimensional em meios porosos por diferenças finitas e considera simulações em aquíferos confinados, não confinados, ou semiconfinados.

A calibração do modelo consiste no ajuste dos valores dos parâmetros, de maneira que os valores das cargas hidráulicas calculadas nos poços com medição representem valores mais próximos possíveis das cargas hidráulicas observadas em campo. Para este procedimento foi empregado o modelo matemático PEST (DOHERTY et al.,1994), de calibração automática, o que possibilitou uma redução no tempo despendido nas calibrações manuais.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida na Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do rio Paraíba, estado da Paraíba, compreendida entre as coordenadas UTM 288000 W e 9230000 N e 303000 E e 9200000 S (Figura 1). É individualizada pela falha tectônica de Cabedelo a oeste, pelo oceano Atlântico ao norte e a leste e pelo divisor de bacia do rio Gramame ao sul. A área totaliza 169,40 km², abrangendo os municípios de João Pessoa e Cabedelo. Apresenta uma quantidade significativa de poços cadastrados, os quais são utilizados para os mais diversos usos. Esta área também apresenta grande concentração de fontes poluidoras de águas subterrâneas, pois abrange a Região Metropolitana de João Pessoa.

A precipitação média anual é de 1498,4 mm (1994 – 2008), sendo maio o mês com maior concentração de chuvas com média de 299,1 mm e novembro o mês mais seco com uma média de 18,9 mm (UACA, 2009).

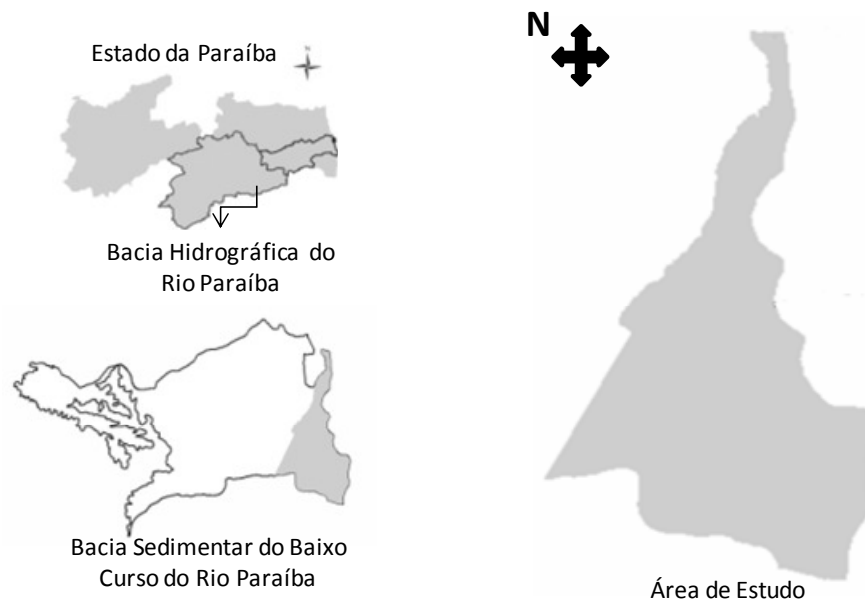


Figura 1 – Área de Estudo

4. MODELAGEM DA ÁREA DE ESTUDO

Antes da modelagem matemática, a construção de um modelo conceitual, é necessária para que se tenha uma visão geral do aspecto hidrogeológico, bem como a identificação de todos os elementos que, de alguma forma, condicionam o fluxo subterrâneo e que por sua importância requerem um maior grau de detalhamento. O entendimento do modelo hidrogeológico conceitual é a base para o modelo matemático.

A área estudada apresenta as formações geológicas Barreiras, Sedimentos Aluviais e Flúvio Marítimos, Gramame e Beberibe (Inferior e Superior) que podem ser observadas na Figura 2. O sistema aquífero é composto por dois subsistemas, um livre, em toda a extensão constituída pelas formações Barreiras e os Sedimentos Aluviais e Flúvio- marítimos; e um subsistema confinado, também em toda a extensão da área de estudo, constituído pelas formações Beberibe superior e inferior (confinado).

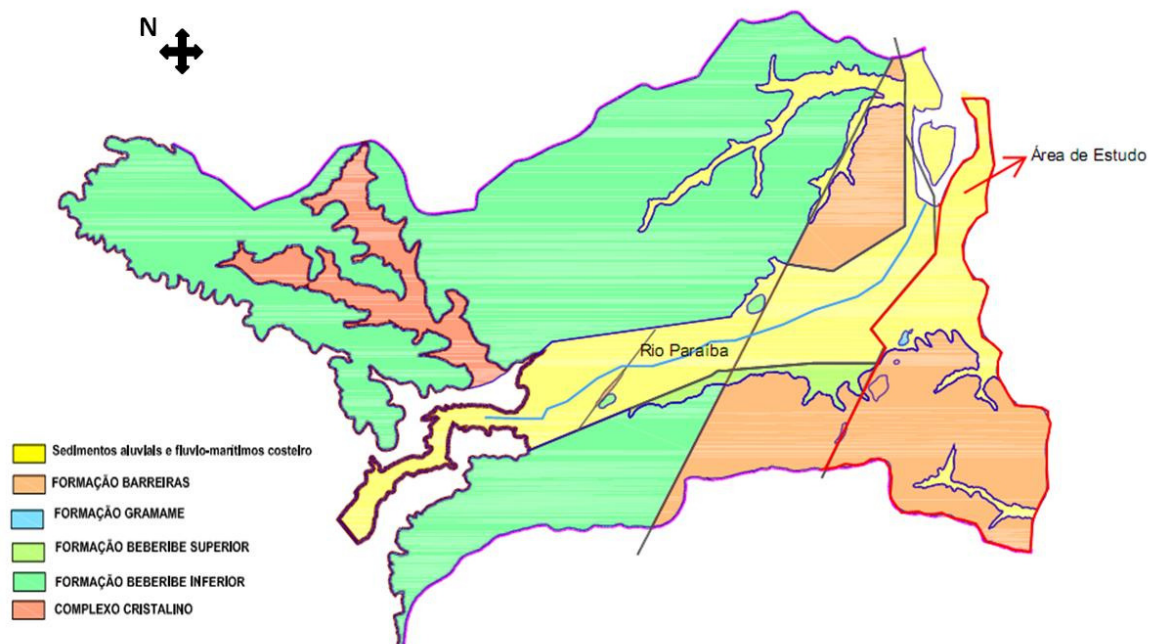


Figura 2 - Mapa Geológico da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba.

O confinamento do aquífero Beberibe é constituído na parte superior pela formação Gramame e na parte inferior pelo embasamento cristalino (Figura 3).

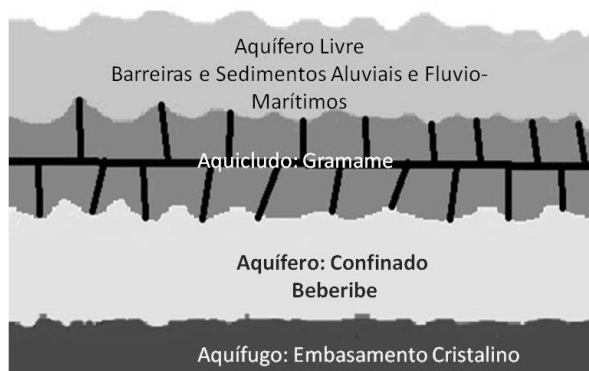


Figura 3 – Distribuição Vertical dos Sistemas Hidrogeológicos da área de estudo.

O subsistema confinado, representado pela formação Beberibe (superior e inferior), apresenta-se com uma boa qualidade de água, fator este que justifica a alta procura para suprir os diversos usos dos recursos hídricos, em particular o abastecimento urbano e industrial. Este importante papel do aquífero confinado justifica a pesquisa dos seus parâmetros hidráulicos.

Nesse estudo utilizou-se um modelo bidimensional horizontal. A malha foi discretizada, horizontalmente, de forma regular, com as células possuindo dimensão de 100 m x 100 m em todo o domínio do modelo, perfazendo uma área de 450 Km². No plano vertical o modelo foi dividido apenas em uma camada, ou uma única unidade hidroestratigráfica, já que se pretendia modelar

apenas o aquífero inferior, totalmente confinado, isto é, sem trocas significativas com o sistema superior livre.

A área modelada apresenta os seguintes contornos físicos: ao norte e a leste a linha da costa do oceano atlântico; a oeste os contactos geológicos com as áreas adjacentes, definidas aproximadamente pela falha geológica de Cabedelo – e ao sul, o divisor de água entre a Bacia Hidrográfica do Baixo Curso do rio Paraíba e a Bacia hidrográfica do rio Gramame (Figura 4).

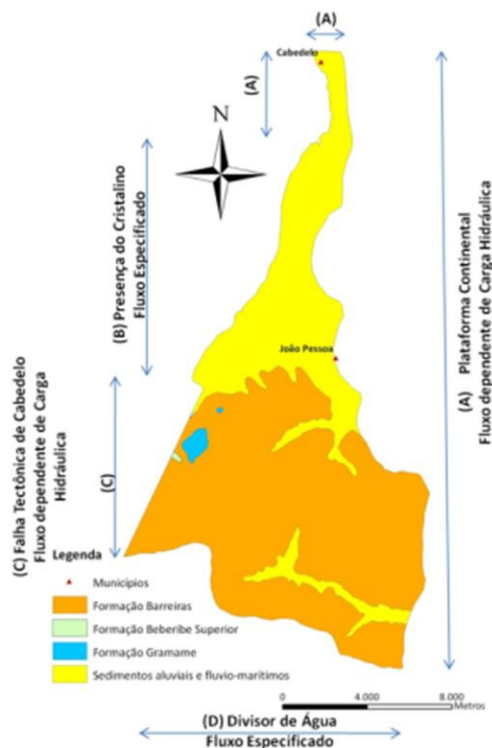


Figura 4 – Condições de Contorno da área modelada

As condições de contorno da área de estudo, são representadas no modelo para diferentes condições hidráulicas, isto é, de fluxo e/ou de carga hidráulica, conforme apresentadas a seguir:

Condição de Contorno (A):

Engloba todo o contorno Leste e Norte da área de estudo e parte noroeste dessa área. O aspecto físico considerado para definição desta condição de contorno foi a plataforma continental, visto que o aquífero confinado Beberibe tem sua extensão até o final da mesma (Figura 5). Portanto, a cota do nível piezométrico, ou seja, a carga hidráulica desse aquífero apresenta-se constante e com valor zero somente no fim da plataforma continental. Para a estimativa das cargas hidráulicas no contorno da área modelada, foi admitida, a partir de algumas cargas hidráulicas medidas em campo, um relação linear para o gradiente hidráulico apresentada na Equação 2 e baseada na Figura 5.

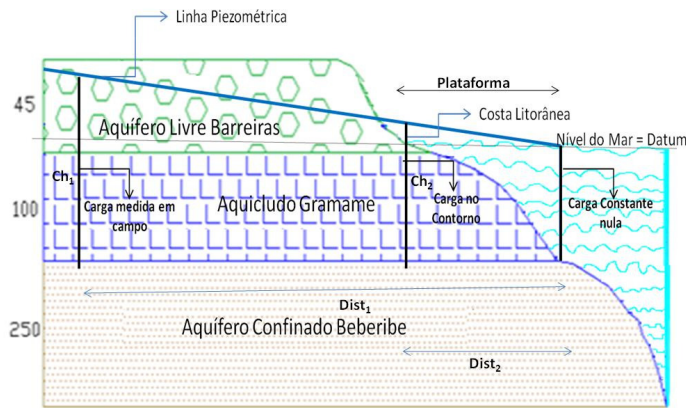


Figura 5 – Esboço da determinação da condição de contorno (A).

$$Ch_2 = \frac{Ch_1 \times Dist_2}{Dist_1} \quad (2)$$

Onde:

Ch_1 = Carga hidráulica medida em campo (medição de campo);

Ch_2 = Carga hidráulica calculada para inserção no contorno;

$Dist_1$ = Distância do ponto de medição ao fim da plataforma continental;

$Dist_2$ = Distância da célula do contorno do modelo até a plataforma continental.

Por apresentar cargas variando no tempo, no regime transitório, esse contorno expressa uma condição de fluxo dependente de carga hidráulica (Condição de Cauchy). No regime permanente as cargas obtidas permanecem fixas.

Condição de Contorno (B):

Na fronteira da região modelada, ocorre presença do embasamento cristalino em contato com a formação Beberibe, onde o fluxo é nulo, expressando uma condição de contorno de fluxo especificado ou condição de Neumann.

Condição de Contorno (C):

Nesse contorno, a formação aquífera Beberibe estende-se para a região vizinha, havendo, portanto fluxo através deste contorno. É um das zonas de recarga do aquífero modelado, onde a carga hidráulica depende do fluxo ou condição de Cauchy.

Condição de Contorno (D):

O divisor de água entre a Região Hidrográfica do Baixo Curso do rio Paraíba e a Bacia hidrográfica do rio Gramame foi admitida como o divisor natural das águas subterrâneas. Assim

estabeleceu-se uma condição de fluxo especificado (condição de Neumann). Nesse caso o fluxo é nulo.

5. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Conforme verificado para solução da equação do fluxo subterrâneo é necessária a determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero (condutividade hidráulica e armazenamento específico). Com os dados de cargas hidráulicas observadas e a aplicação do modelo matemático, esses parâmetros são determinados através de processos de calibração.

A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero estudado aconteceu em duas etapas: i) em estado permanente para a calibração da condutividade hidráulica e ii) no estado transiente (transitório) para a obtenção do armazenamento específico.

Calibração da Condutividade Hidráulica (K)

Na etapa de calibração da condutividade hidráulica foi utilizado o regime de fluxo permanente, ou seja, a carga hidráulica não varia com o tempo, o que implica na anulação do segundo membro da equação do fluxo subterrâneo (Equação 2).

Os dados de medição das profundidades dos níveis estáticos dos 16 poços utilizados para a obtenção das cotas topográficas e dos respectivos níveis piezométricos foram obtidos no mês de julho de 2009. Destaca-se que a carga hidráulica é obtida pela diferença entre a cota topográfica do ponto e a profundidade do nível estático (NE) medido em campo. Na Tabela 1, que também apresenta a localização de cada poço, estão indicadas as referidas cotas.

Tabela 1 – Dados de níveis estáticos (julho de 2009)

Poço	Localidade	Proprietário	Cota Topográfica (m)	Longitude	Latitude	Prof. NE(m) julho 2009	C.H.*(m) Julho 2009
1	Anatólia	CAGEPA	23	296322	9209110	30,22	-7,22
2	Conj. José Américo	CAGEPA	46	294690	9207656	44,92	1,08
3	Cristo Redentor	CAGEPA	63	293029	9208725	41,50	21,50
4	Cruz Das Armas	CAGEPA	49	291365	9210448	47,61	1,57
5	Funcionários II	CAGEPA	54	292058	9205428	41,15	12,58
6	P. Exp. De animais	CAGEPA	46	292605	9207218	18,96	27,04
7	Torre	CAGEPA	45	294364	9212479	51,17	-6,17
8	Val. Figueiredo (p2)	CAGEPA	40	296634	9202832	33,27	6,73
9	Val. Figueiredo (p3)	CAGEPA	43	296803	9204122	41,49	1,51
10	Tambaú	CAGEPA	31	297429	9213196	38,87	-7,87
11	Sede II	CAGEPA	2	297813	9229144	0,44	1,56
12	Sede	CAGEPA	6	297595	9229030	0,50	5,5
13	Mangabeira II	CAGEPA	50	296719	9206868	43,46	6,54
14	Mangabeira VII	CAGEPA	42	298085	9206922	44,75	-2,75
15	Camalaú	CAGEPA	3	297856	9227368	1,91	1,09
16	Praia do Poço	CAGEPA	6	297501	9223536	4,08	1,92

* CH = Carga Hidráulica

No modelo matemático para o regime permanente, somente foi necessário colocar as condições iniciais nas cargas com valores fixos, ou seja, nas partes leste, norte, noroeste e sudoeste da área de estudo. As condições de contornos A e C (vide Figura 4) mudam de categoria e passam de carga dependente de fluxo (Condição de Cauchy) no regime transitório, para carga fixa conhecida (Condição de Dirichlet) no presente caso de fluxo permanente. Para o contorno (A), as cargas hidráulicas calculadas foram obtidas de acordo com a Equação 2 e as cargas hidráulicas do contorno (C), foram estabelecidas pela interpolação das medições dos níveis piezométricos dos poços próximos a esse contorno.

Uma observação importante para a calibração da condutividade hidráulica foi a especificação de cargas fixas no modelo matemático para os poços com valores de cotas de níveis potenciométricos medidos em julho de 2009 na área de estudo. Dessa forma, foram consideradas as influências dos poços para esses locais. As cargas hidráulicas inseridas estão especificadas na Tabela 1.

Por não se apresentar de forma homogênea, a condutividade hidráulica na área modelada, utilizaram-se dois métodos para delimitação de áreas de mesma condutividade hidráulica, quais foram: (i) método das iso-condutividades e (ii) método considerando a presença da formação Beberibe completa (superior e inferior).

As iso-condutividades são linhas que apresentam mesma condutividade. Para a determinação dessas linhas utilizaram-se os valores das condutividades hidráulicas obtidas através dos testes de bombeamento em alguns poços da área estudada (Tabela 2).

Tabela 2 – Condutividade hidráulica obtida através de ensaio de bombeamento.

LOCALIDADE	Cruz das Armas	Alto do Mateus II	Ciad	Sede Saelpa (cristo red)	Distrito Industrial	Hospital Universitário
K(m/d)	1,18	0,24	1,03	0,261	5,94	5,24

A partir de interpolação foram traçadas as iso-condutividades (Figura 6). Com base nesses resultados, estabelecidas áreas de condutividade hidráulica com intervalos especificados. Destaca-se que, esses intervalos foram utilizados como parâmetros de entrada no modelo, ou seja, foram especificados valores iniciais de condutividade hidráulica para que o modelo matemático fosse processado e calibrado.

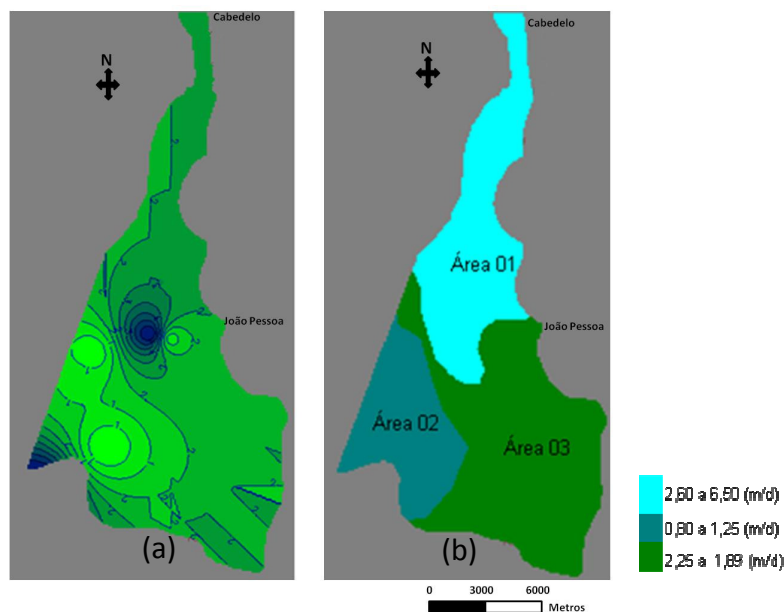


Figura 6 – Método da (a) Iso – condutividades e (b) áreas de condutividade hidráulicas, com respectivos intervalos de condutividade hidráulica.

Após várias tentativas de calibração, verificou-se que aplicando-se apenas o método das iso-condutividades não se alcançava a calibração satisfatória do modelo, principalmente na região representada pelas áreas 2 e 3 (Figura 6), onde se apresentam as formações Beberibe superior e inferior. Isso foi observado pelos perfis lito-estratigráficos utilizados nessa pesquisa. Portanto, foram traçadas novas áreas de condutividade hidráulica considerando tanto o método (i) como o método (ii), obtendo-se finalmente a delimitação mostrada na Figura 7. Com esta subdivisão em áreas de diferentes condutividades hidráulicas foi possível a calibração do modelo, através do ajuste satisfatório entre cargas hidráulicas calculadas e observadas. Os valores obtidos para a condutividade hidráulica são apresentados mais adiante neste artigo.

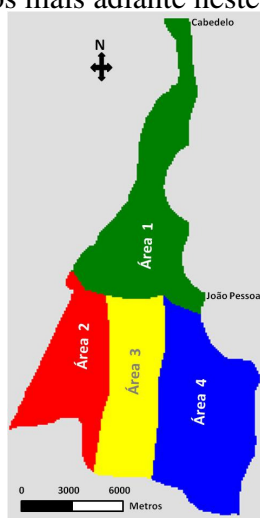


Figura 7 – Áreas de condutividade.

Calibração do Armazenamento Específico (Ss)

Para a calibração do armazenamento específico, o escoamento foi simulado em regime transitório (transiente), ou seja, com a carga hidráulica apresentando variações ao longo do tempo. O período empregado foi de julho a outubro de 2009.

Os dados de medição da profundidade dos níveis estáticos dos poços, utilizados para a obtenção da cota do nível piezométrico foram obtidos durante os meses de julho e outubro de 2009. Alguns poços observados no mês de julho não puderam ser medidos no mês de outubro por problemas operacionais. Somente os poços que tiveram as medições nas duas campanhas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de níveis estáticos (julho e outubro de 2009)

Poço	Localidade	Cota Topográfica (m)	Longitude	Latitude	Prof. do NE(m) Julho 2009	C.H.*(m) Julho 2009	PROF. NE(m) Outubro 2009	C.H.*(m) Outubro 2009
1	ANATÓLIA	23	296322	9209110	30,22	-7,22	32,08	-9,08
2	CAMALAUÍ	3	297856	9227368	1,91	1,09	2,24	0,76
3	GROTÃO R 27	54	292058	9205428	41,15	12,58	41,98	11,75
4	José Américo	46	294690	9207656	44,92	1,08	44,13	-1,87
5	MANGABEIRA II	50	296719	9206868	43,46	6,54	45,65	4,35
6	MANGABEIRA VII	42	298085	9206922	44,75	-2,75	43,85	-1,85
7	P EXPOSIÇÃO DE ANIMAIS	46	292605	9207218	18,96	27,04	19,65	26,35
8	PRAIA DO POÇO	2	297501	9223536	4,08	-2,08	4,23	1,20
9	SEDE	6	297595	9229030	0,50	5,50	0,8	5,25
10	SEDE II	2	297813	9229144	0,44	1,56	0,77	1,23
11	TAMBAÚ	31	297439	9213198	38,70	-7,70	41,09	-10,09

* Carga Hidráulica

No regime transitório, as condições de contorno da parte noroeste, norte, leste e sudoeste precisaram ser modificadas, uma vez que nesse caso há variação das cargas nas fronteiras ao longo do tempo. Utilizou-se para a presente etapa a condição de contorno de Cauchy, fluxo dependente de carga hidráulica.

A ferramenta GHB (General Head Boundary) do MODFLOW permite o cálculo das cargas hidráulicas dependendo do fluxo. Dois parâmetros constituem essa ferramenta:

A *Condutância* – Expressa o produto da condutividade hidráulica e da distância entre os centros da célula, calculada pela Equação 3:

$$C = Kxd_{cent} \quad (3)$$

Onde:

K = condutividade Hidráulica [L/T];

C = Condutância [L²/T];

d_{cent} = distância entre os centros das células[L], para o estudo 100 m.

A *Carga Externa ao Contorno* – Para cálculo desse parâmetro utiliza-se a metodologia do princípio dos vasos comunicantes, estabelecendo uma inter-relação entre a parte interna e a parte externa da área de estudo. As cargas externas ao contorno, nos meses de julho e outubro, quando foram feitas as campanhas de medição, foram obtidas com a Equação 2, considerando as hipóteses já relatadas e esquematizada na Figura 4. Adotando-se o intervalo mensal (passo de tempo da simulação) são necessárias as cargas hidráulicas correspondentes aos períodos intermediários entre as medições. Nesse caso foram admitidas as seguintes relações lineares para a obtenção da carga externa nos meses de agosto e setembro, uma vez que se têm as cargas hidráulicas em julho e outubro advindas das medições de campo:

$$h_{agosto} = h_{julho} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{n} \quad (4)$$

$$h_{setembro} = h_{agosto} - \frac{(h_{julho} - h_{outubro})}{n} \quad (5)$$

Onde:

n : é o número de períodos;

h_{julho} : carga medida em julho(m);

h_{agosto} : carga externa no mês de agosto(m);

h_{setembro} : carga externa no mês de agosto(m);

h_{outubro} : carga medida em outubro(m).

No modelo matemático para que seja simulado o regime transitório deve ser informada a quantidade de períodos. Nesse caso, foram adotados quatro períodos compreendendo o intervalo entre os meses de julho a outubro de 2009.

Outro aspecto considerado para a calibração do armazenamento específico, em virtude do subsistema confinado estar “perturbado”, foram os bombeamentos dos poços ocorrentes na área de estudo. Esses bombeamentos representam, juntamente com a circulação natural do subsistema, a variação da carga hidráulica no regime transitório. Simultaneamente à calibração do armazenamento específico, foram determinadas as vazões de exploração ocorrentes na área

modelada. As vazões dos poços foram inseridas no modelo matemático (período de julho a outubro) da CAGEPA (Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba) apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Poços de bombeamento

Poços	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Vazões (m ³ /d)
1	ALT. CABO BRANCO	CAGEPA	298220	9211096	1300,00
2	CONJ. JOSÉ AMÉRICO	CAGEPA	294690	9207656	3600,00
3	CRISTO REDENTOR	CAGEPA	293029	9208725	1300,00
4	CRUZ DAS ARMAS	CAGEPA	291365	9210448	1500,00
5	MATA DE BURAQUINHO	CAGEPA	294463	9210820	3000,00
6	PRAIA DA PENHA II	CAGEPA	301288	9207560	750,00
7	TORRE	CAGEPA	294364	9212479	2500,00
8	VAL. FIGUEIREDO (P1)	CAGEPA	296410	9203782	500,00
9	VAL. FIGUEIREDO (P2)	CAGEPA	296634	9202832	500,00
10	VAL. FIGUEIREDO (P3)	CAGEPA	296803	9204122	500,00
11		CAGEPA	296447	9205664	1000,00
12		CAGEPA	291875	9205430	2000,00
13		CAGEPA	290060	9206559	2000,00

Para a calibração do armazenamento específico, necessitou-se de valores iniciais para essa grandeza. Esses foram calculados a partir do coeficiente de armazenamento médio determinado no estudo de Costa et al. (2007). Os valores estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores iniciais de armazenamento específicos para as áreas

Áreas	Coefficiente de Armazenamento - S (adimensional)	b _{média} (m)	Armazenamento Específico - Ss(1/m)
1	$1,50 \times 10^{-4}$	136,00	$1,10 \times 10^{-6}$
2	$1,50 \times 10^{-4}$	190,00	$0,79 \times 10^{-6}$
3	$1,50 \times 10^{-4}$	220,50	$0,52 \times 10^{-6}$
4	$1,50 \times 10^{-4}$	132,50	$1,13 \times 10^{-6}$

As condições iniciais utilizadas foram as cargas calculadas pelo modelo no regime permanente quando ocorreu a calibração da condutividade hidráulica. Ressalta-se que para representar a distribuição espacial do armazenamento específico, foram utilizadas as mesmas áreas determinadas para a calibração da condutividade hidráulica. A Figura 8 mostra a superfície piezométrica observada e calculada para o mês de outubro. Nela pode-se verificar que as linhas equipotenciais apresentam formatos e valores não coincidentes, sendo as linhas calculadas de valores mais elevados. Isso indica que as vazões reais são maiores do que as simuladas, que foram aquelas informadas para os poços em funcionamento da CAGEPA. Por isso, para se chegar ao rebaixamento, foram inseridas além das vazões dos poços mencionados anteriormente, outros poços

de bombeamento presentes no cadastro da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA) para a calibração do armazenamento específico e consequentemente, a determinação da vazão de exploração do aquífero modelado.

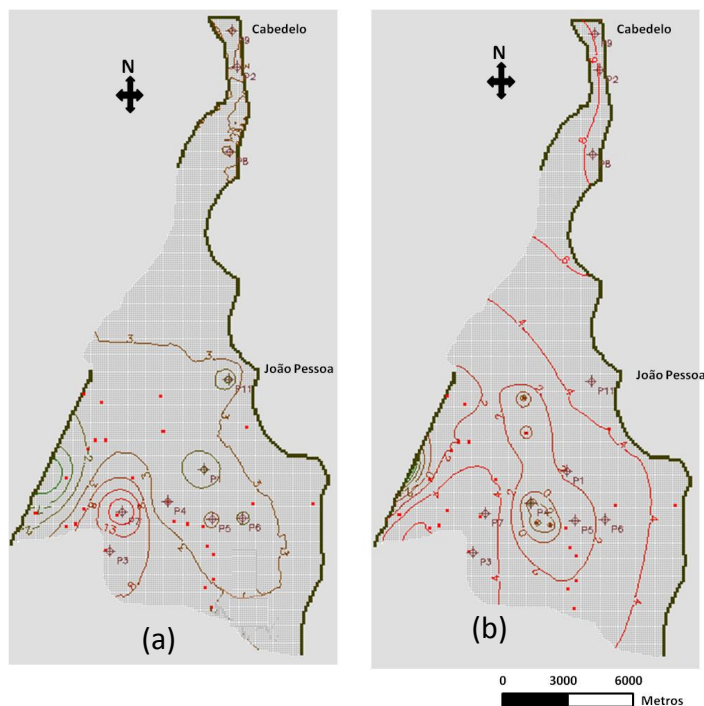


Figura 8 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.

6. RESULTADOS

Condutividade Hidráulica (K)

Conforme descrito, o parâmetro determinado nessa calibração foi a condutividade hidráulica, de acordo com as áreas propostas a partir dos testes de bombeamento e das características da formação Beberibe (Superior e Inferior) conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Condutividade hidráulica para a área de estudo

Áreas	Condutividade Hidráulica	
	(m/d)	(m/s)
1	6,50	$7,52 \times 10^{-5}$
2	6,00	$6,94 \times 10^{-5}$
3	1,50	$1,74 \times 10^{-5}$
4	13,50	$1,56 \times 10^{-4}$

A Figura 9 apresenta o diagrama de dispersão, das cargas observadas e calculadas. Esse diagrama mostra que, em geral, os valores de carga hidráulica observada apresentam a mesma

tendência das cargas calculadas, o que implica em dizer que a calibração pode ser considerada satisfatória. Os valores mais discrepantes correspondem aos pontos onde as cargas hidráulicas possuem maior valor.

A Figura 10 mostra as superfícies potenciométricas calculadas e observadas, para o mês de julho de 2009, empregada para a calibração. Nela pode-se observar que as direções de fluxo (perpendiculares às linhas equipotenciais) são praticamente as mesmas, muito embora as piezometrias não sejam totalmente coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na Figura 10, o modelo foi considerado calibrado, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente.

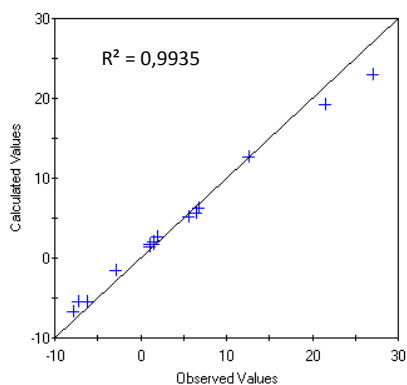


Figura 9 - Diagrama de dispersão obtido na calibração estacionária (permanente) para 16 poços usados nesta calibração.

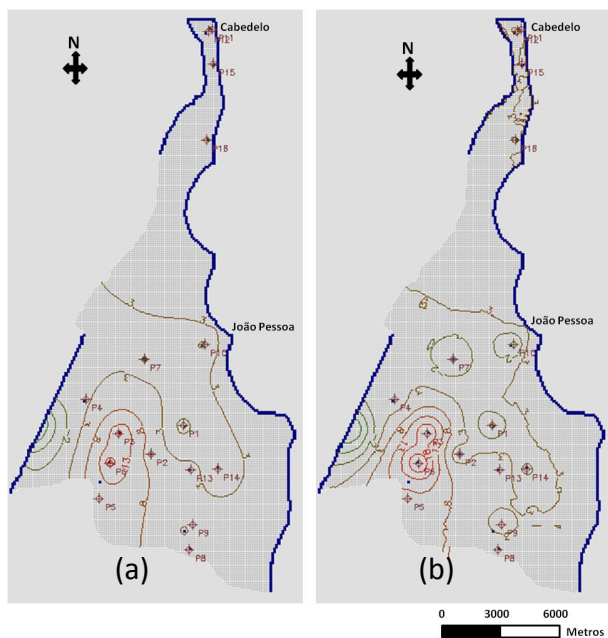


Figura 10 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica calculadas (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) em julho de 2009.

Armazenamento Específico (Ss)

Os parâmetros determinados nesta calibração referem-se, portanto, aos armazenamentos específicos e, simultaneamente, às taxas de bombeamento dos poços do aquífero Beberibe. O processo consistiu em aumentar a vazão bombeada e processar a calibração automática do armazenamento específico (com o programa computacional PEST), até atingir um ajuste aceitável. Os valores do armazenamento específico estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Armazenamento específico calibrados

Áreas	1	2	3	4
Armazenamento Específico (1/m)	$1,10 \times 10^{-7}$	$1,43 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-7}$	$1,96 \times 10^{-5}$

A Figura 11 apresenta o diagrama de dispersão das cargas observadas e calculadas. Esse diagrama mostra que, em geral, os valores de carga hidráulica observados apresentam a mesma tendência das cargas calculadas, o que implica em dizer que a calibração pode ser considerada satisfatória. Os valores mais discrepantes correspondem aos pontos onde as cargas hidráulicas possuem maior valor.

A Figura 12 mostra as linhas equipotenciais calculadas e observadas, para o mês de outubro de 2009, empregadas para a calibração. Na Figura pode-se observar que as direções de fluxo (perpendiculares às linhas equipotenciais) são praticamente as mesmas, muito embora as piezometrias não sejam totalmente coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na Figura 12, o modelo foi considerado calibrado, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente.

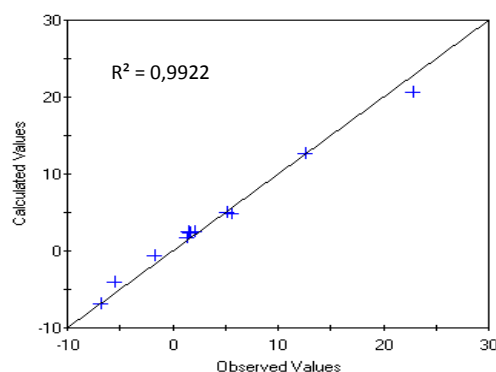


Figura 11 - Diagrama de dispersão obtido na calibração transiente para 11 poços usados nesta calibração.

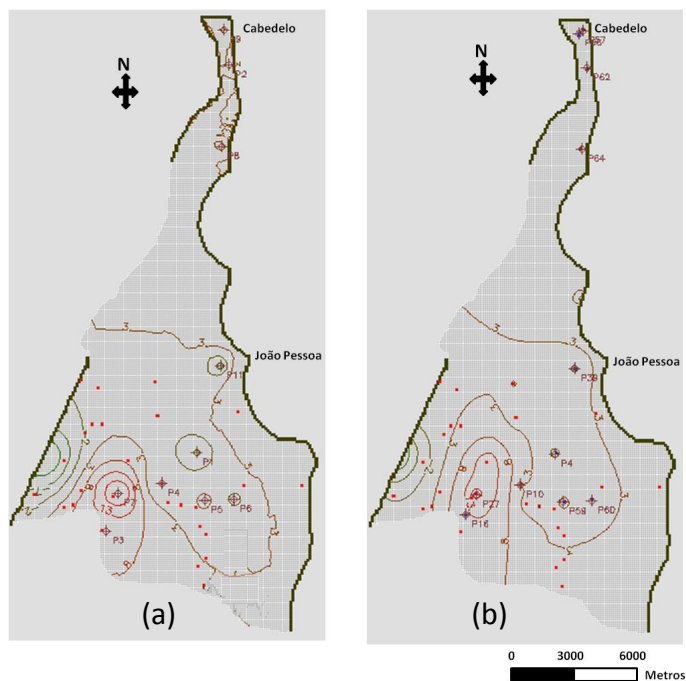


Figura 12 – Mapa potenciométrico (a) valores de carga hidráulica observados (5 em 5 m) e (b) valores de carga hidráulica calculados (5 em 5 m) em outubro de 2009.

A Tabela 8 apresenta a localização dos poços e os valores das vazões calibradas pelo modelo.

Tabela 8 – Poços de bombeamento com vazões calibradas para área de estudo

Poços	Localidade	Proprietário	Longitude	Latitude	Vazões por poços (m ³ /d)
1	Alt. Cabo branco	CAGEPA	298220	9211096	1320,00
2	Conj. José Américo	CAGEPA	294690	9207656	3000,00
3	Cristo Redentor	CAGEPA	293029	9208725	1320,00
4	Cruz das Armas	CAGEPA	291365	9210448	2000,00
5	Mata de Buraquinho	CAGEPA	294463	9210820	3000,00
6	Praia da Penha II	CAGEPA	301288	9207560	960,00
7	Torre	CAGEPA	294364	9212479	2500,00
8	Val. Figueiredo (p1)	CAGEPA	296410	9203782	500,00
9	Val. Figueiredo (p2)	CAGEPA	296634	9202832	500,00
10	Val. Figueiredo (p3)	CAGEPA	296803	9204122	500,00
11		CAGEPA	296447	9205664	1000,00
12		CAGEPA	291875	9205430	2000,00
13		CAGEPA	290060	9206559	2000,00
14		Particular	296763	9205308	2000,00
15		Particular	298538	9207595	1000,00
16		Particular	292360	9207045	2000,00
17		Particular	290459	9206625	2000,00
18		Particular	290895	9212523	2000,00
19		Particular	291013	9210057	2000,00
20		Particular	291821	9210462	2000,00
21		Particular	290886	9207362	2000,00
22		Particular	288707	9207201	2000,00
23		Particular	200103	9208766	2000,00
24		Particular	291664	9212127	2000,00
25		Particular	292369	9207110	2000,00
26		Particular	294977	9206757	3000,00
27		Particular	295555	9206662	3000,00
28		Particular	296253	9206567	3000,00

Os resultados dos parâmetros da condutividade hidráulica e do armazenamento específico encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros hidrodinâmicos calibrados para a área de estudo

Áreas	1	2	3	4
Condutividade Hidráulica (m/d)	6,50	6,00	1,50	13,5
Armazenamento Específico (1/m)	$1,10 \times 10^{-7}$	$1,43 \times 10^{-7}$	$1,64 \times 10^{-7}$	$1,96 \times 10^{-5}$

7. CONCLUSÕES

A aplicação de modelos matemáticos para determinação das propriedades hidráulicas, objetivo dessa pesquisa, apresentou-se como eficiente, uma vez que foi possível obter mapas potenciométricos através do modelo semelhantes ao observado em campo.

A calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do subsistema confinado, confirmou as hipóteses formuladas para os contornos da área de estudo. Essas hipóteses se mostraram bastante razoáveis ao permitir a calibração dos parâmetros na forma de ajuste das cargas hidráulicas calculadas, quando estas são comparadas com as cargas observadas em campo. Essa etapa pode ser melhorada a medida que sejam inseridos dados de cargas hidráulicas observadas em campo, e realizados teste de bombeamento distribuídos uniformemente por toda a área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa se insere no âmbito do projeto “*Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas*” financiado pelo MCT/FINEP/CT-HIDRO. O primeiro autor recebeu bolsa de estudo da CAPES durante a realização desta pesquisa. Os autores agradecem as instituições mencionadas.

BIBLIOGRAFIA

- COSTA, W. D.; ALBUQUERQUE, J. do P. T.; BRANCO, R. L. de C.; MARANHÃO, C. M. L.; GOLDFABER, M. (2007). Estudo de caracterização e verificação da disponibilidade hídrica da vertente litorânea do estado da Paraíba. Estudos Hidrogeológicos. Relatório Final. Tomo I – Texto. Ministério da Integração Nacional.
- DOHERTY, J.; BREBBER, L. e WHITE, P. (1994). PEST – Model Independent Parameter Estimation. User’s Manual. Watermark Computing. Austrália.
- McDONALD, M. G. e HARBAUGH, A. W. 1988. A Modular three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.
- UACA – Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande. (2009). Informações climatológicas. Disponível em <www.dca.ufcg.edu.br/tsm.htm>. Acesso: Dezembro. 2009.