

## CAPÍTULO II

### MÉTODOS E ASPECTOS TEÓRICOS

#### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os métodos empregados nesta pesquisa consistiram preliminarmente na realização de uma revisão bibliográfica do meio físico da região, levantamentos de trabalhos anteriores, e estudo dos métodos que seriam empregados para a obtenção dos dados enumerados nos objetivos do trabalho. A Figura 2.1 apresenta a organização geral da metodologia aplicada no desenvolvimento do presente estudo.

As apresentações das características e dos dados de investigação da área foram apoiadas na base cartográfica da CPRM (2002), CPRM & CBPM (2003) e da ANA, disponíveis na forma digital em SIG, por meio de arquivos bases do *software* Arcview 3.1®, em CD-ROM e no *site* do sistema de informações da ANA - Hidroweb. Os arquivos constituem um universo maior de dados do meio físico, dentre eles as redes hidrográfica e rodoviária, sedes e limites municipais, base geológica, entre outras informações, que finalizam em mapas temáticos com edição inédita.

A área foi estudada por meio dos SIG's anteriormente citados, associados com a visualização de imagens de satélite Landsat 7/ETM<sup>+</sup> da área, com combinação de bandas espectrais para composição de falsa cor, para observação dos padrões de drenagem, forma e grau de ocupação da área, bem como para subsidiar os trabalhos de campo. As cenas utilizadas foram: 220/70, 220/69, 220/68, 220/67, de 1987 e 2001. Ressalta-se também o uso de modelos digitais de elevação, obtidos pelo processamento de imagens de radar, disponibilizados no *site* do CGIAR (*The Consortium for Spatial Information*).

Utilizou-se também para os planejamentos de logística de trabalhos de campo, sobretudo para o cadastro de poços e para o levantamento geofísico, as imagens disponíveis no Google Earth®, todos com o auxílio das cartas plani-altimétrica na escala 1:100.000 da região e GPS.

Muitas informações referentes à hidrogeologia da área foram obtidas junto aos órgãos governamentais do estado da Bahia, com destaque para a SRH-BA e a CERB, que cederam dados dos seus cadastros de poços, com informações importantes para a caracterização do Sistema Aquífero Urucuia. Também foram obtidos dados de diversos poços da região, perfurados pela empresa Mauerberg Poços Artesianos Ltda. e pela empresa Fuad Rassi. Esses dados foram reunidos e organizados de forma a facilitar o manuseio e seu melhor aproveitamento.

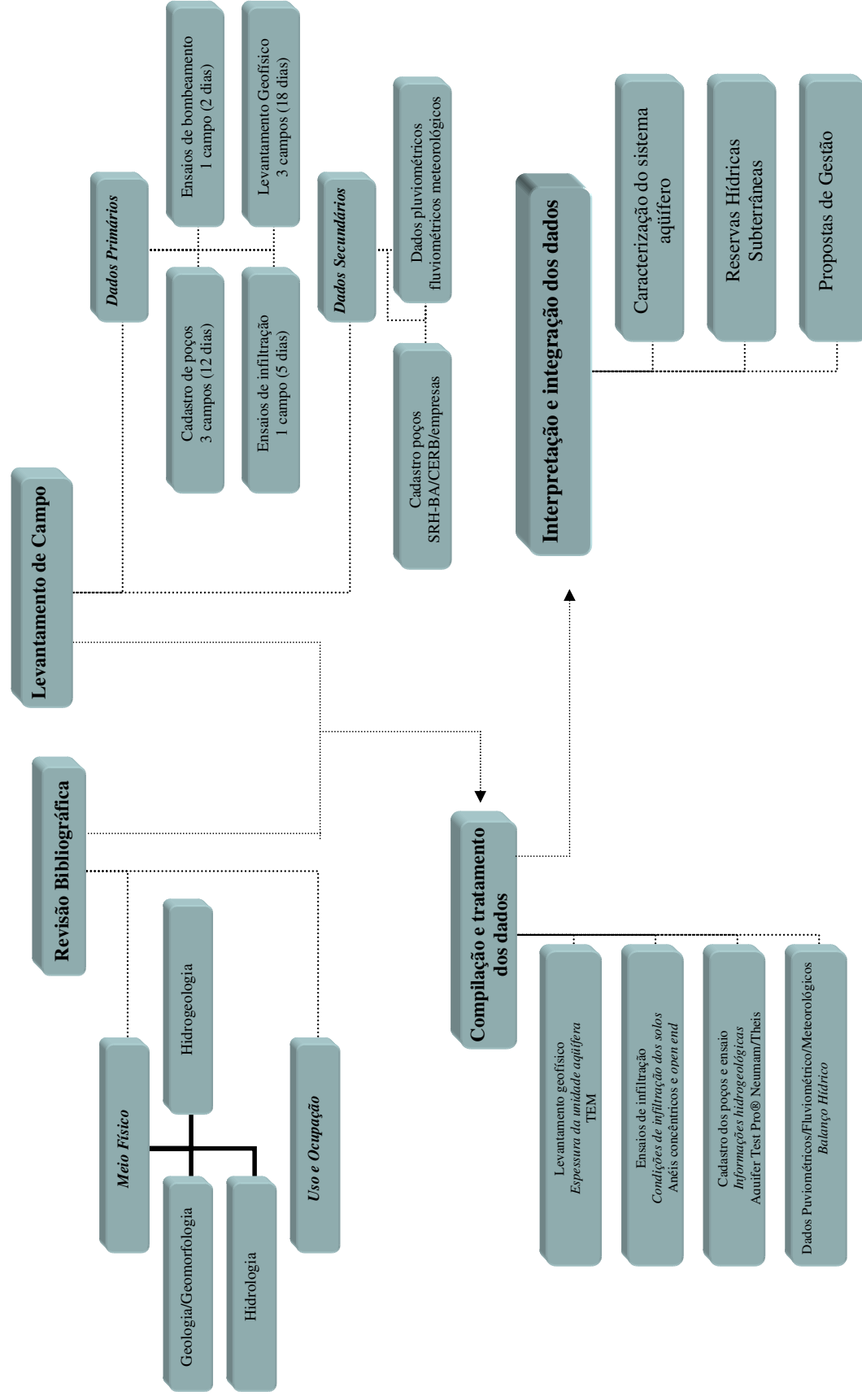


Figura 2.1 – Organograma metodológico aplicado ao desenvolvimento da presente tese de doutoramento.

Realizou-se ainda, no âmbito desta pesquisa, um cadastro próprio de poços em campo, com o intuito de conhecer de forma mais ampla a área, e complementar as informações cedidas pelas empresas mencionadas. Ressaltam-se as dificuldades inerentes a esse levantamento, que dificultaram a obtenção de um maior número de informações.

## 2.2 GEOLOGIA

O reconhecimento geológico da região do oeste baiano foi focado na geologia do Grupo Urucuia que constitui a unidade hidrogeológica que ocupa a área mais ampla da poligonal estudada. Realizou-se por meio de um levantamento bibliográfico atualizado, com consulta a diversos autores. O contexto geológico regional fundamentou-se, sobretudo na base cartográfica geológica da CPRM (2002). A geologia no contexto de ocorrência do aquífero em estudo baseou-se em levantamentos de campo, com visitas a afloramentos do Grupo Urucuia; perfis litológicos de poços perfurados na região; e, nos trabalhos do levantamento bibliográfico mais atuais desenvolvidos na área.

## 2.3. GEOFÍSICA

Os estudos geofísicos no âmbito desta pesquisa buscaram principalmente a obtenção da espessura das rochas do Grupo Urucuia, com vistas ao cálculo das reservas hídricas subterrâneas do sistema aquífero e definição mais precisa de seu potencial. Utilizou-se para este fim, uma avaliação dos valores de resistividade das rochas, que constituem na área de estudo um contraste entre arenitos mais resistivos, do Grupo Urucuia, com um substrato pelito-carbonatado menos resistivo, do Grupo Bambuí ou das rochas do embasamento cristalino. O método empregado nesta pesquisa foi o eletromagnético com medições no domínio do tempo (TEM *Time-Domain* ou *Transient Eletromagnetic*), reportado por Fitterman & Stewart (1986) para utilização em hidroestratigrafia regional.

As apresentações dos fundamentos teóricos e das configurações do levantamento geofísico serão apresentadas no capítulo VI, que discorre especificamente sobre o uso da geofísica como ferramenta de pesquisa neste trabalho.

Estudos de levantamentos geofísicos anteriores na área de pesquisa foram utilizados como complementação e discussão dos dados obtidos, como os de Tschiedel (2004), Bonfim & Gomes (2004), Amorim Junior & Lima (2003), e Amorim Junior (2003).

## 2.4 HIDROGEOLOGIA

A pesquisa em hidrogeologia envolveu o uso de métodos de interpretação de dados dos aquíferos, balanço hídrico, cálculo de reservas, estudo da zona vadosa, com o intuito de fazer uma eficiente caracterização do sistema aquífero, com integração de dados de climatologia, solos, hidrologia, bem como as informações hidrogeológicas propriamente ditas. Essa característica multidisciplinar da pesquisa hidrogeológica deve-se principalmente ao comportamento integrado dos aquíferos no ciclo hidrológico, que interagem com as condições climáticas, regimes fluviais, condições de uso e ocupação do solo.

Todo manuseio, análise e interpretação dos dados neste trabalho focaram o uso de métodos de avaliação do fluxo em meio poroso. Os dados foram avaliados por meio da observação, leitura e/ou coleta de alguns parâmetros em poços tubulares perfurados na região, por meio dos relatórios dos poços dos cadastros ou em observações de campo.

Os métodos de interpretação englobaram a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero: condutividade hidráulica ( $K$ ), transmissividade ( $T$ ), coeficiente de armazenamento ( $S$ ), rebaixamento ( $s$ ) e nível dinâmico (ND), por meio de ensaios de bombeamento, também disponibilizados nas fichas de poços perfurados pelas empresas Mauerberg, Fuad Rassi e CERB.

Os métodos usados nesta pesquisa e apresentados a seguir referem-se à obtenção de toda informação pertinente para a caracterização hidrogeológica do SAU e inclui o estudo da zona vadosa e da zona saturada, a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, a confecção do balanço hidrogeológico e o cálculo das reservas hídricas subterrâneas.

### 2.4.1 Zona Vadosa

Os estudos dos solos desenvolvidos sobre o SAU foram realizados para o conhecimento superficial da zona vadosa dos aquíferos, e para obter informações sobre os solos da área de recarga, dispostos na região do chapadão do oeste baiano.

Os estudos desses solos enfocaram os seus manejo e uso, por meio de observações em imagens de satélites e de campo. Realizou-se uma avaliação dos valores de condutividade hidráulica verticais ( $K_v$ ) dos solos em superfície e em diferentes profundidades dos perfis dos mesmos. Para tanto foram feitos ensaios de infiltração pelos métodos do infiltrômetro de duplo anel ou anéis concêntricos e testes tipo *open end hole*.

Em cada ponto foram realizados ensaios de infiltração para a estimativa dos valores da condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) dos solos, sendo cada ponto testado em superfície, com

aplicação do método do infiltrômetro de duplo anel e, em profundidade, com aplicação de testes tipo *open end hole*. Conforme ABGE (1996) esses ensaios são classificados como ensaios de rebaixamento, realizados com carga variável (flutuação do nível d'água) e com injeção de água, na zona não saturada do aquífero. Esses métodos têm como principal característica direcionar a infiltração da água verticalmente, possibilitando a avaliação do potencial superficial dos solos à recarga nos períodos de excedente hídrico.

Os ensaios com infiltrômetro de duplo anel foram realizados com um cilindro duplo, concêntrico, de aço, de 25 cm de altura, com diâmetro de 35 cm do anel interno e de 45 cm do externo, cravados entre 5 e 10 cm nos solos, para os testes superficiais (figura 2.2). Nesse tipo de infiltrômetro a água é adicionada nos dois compartimentos do anel, sendo que a função do anel externo é evitar a dispersão da água a partir do anel interno e garantir a verticalidade do movimento da água no solo. Para tanto, o anel externo deve ter o nível d'água sempre acima do nível no anel interno (Bernardo 1986).

O cálculo dos valores da condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) com esse método, considerando a carga variável, foi determinado pela seguinte equação:

$$K_v = U \cdot \frac{I}{\Delta t} \cdot \ln \frac{h_0}{h_t}, \text{ onde:}$$

$K_v$  = condutividade hidráulica vertical (m/s);

$U$  = fator de conversão de mm/min para m/s = 1/60000;

$I$  = profundidade de penetração do anel no solo (mm);

$\Delta t$  = o intervalo de tempo do ensaio (s);

$h_0/h_t$  = razão entre os níveis d'água inicial e final no anel interno.

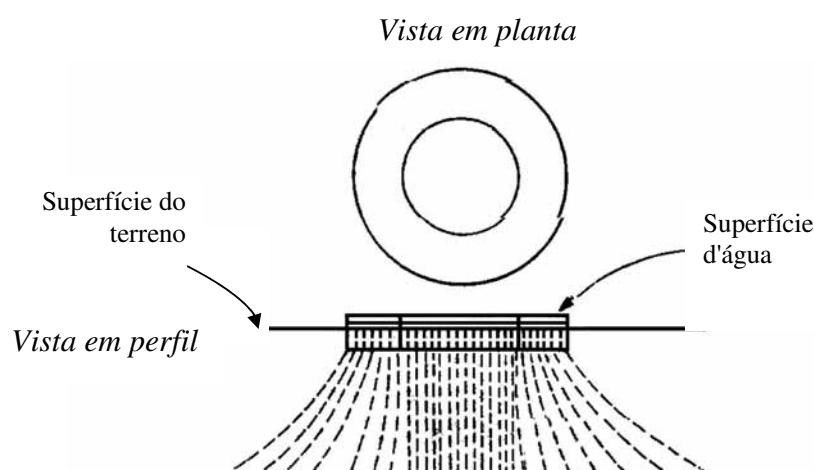


Figura 2.2 – Vista esquemática do método dos anéis concêntricos.

Os ensaios do tipo *open end* foram utilizado para a avaliação de  $K_v$  nas profundidades de 50, 100, 150 e 200 cm, por meio da utilização de poços de observação revestidos por tubos de PVC de 100 mm. Para a determinação da  $K_v$  utilizou-se a seguinte equação (adaptada de *Earth Manual* 1974):

$$K_v = \frac{r_1}{4 \cdot \Delta t} \cdot 2,303 \log \frac{h_0}{h_t}$$

, onde:

$K_v$  = condutividade hidráulica vertical (m/s);

$r_1$  = raio interior do tubo de PVC (m);

$\Delta t$  = o intervalo de tempo do ensaio (s);

$h_0/h_t$  = razão entre os níveis d'água inicial e final no anel interno.

As medidas do nível inicial da água ( $h_0$  em m) foram realizadas após uma pequena estabilização do rebaixamento. Após um intervalo de tempo ( $\Delta t$  em s) verifica-se o nível final da água ( $h_t$  em m).

Em alguns locais de realização dos ensaios foram feitas amostragens dos solos em diferentes profundidades para a realização de análises granulométricas, com intuito de verificar possíveis variações na granulometria ao longo dos perfis.

#### 2.4.2 Caracterização do Sistema Aquífero

A caracterização do Sistema Aquífero Urucuia e seus subtipos de aquíferos foi feita com base em informações geológicas, hidrogeológicas obtidas durante o estudo e de trabalhos anteriores desenvolvidos na área.

A partir de dados coletados, informações dos cadastros e de campo foi possível reconhecer no SAU subtipos de aquíferos, ao considerar a existência de características hidrogeológicas diferenciadas entre aquíferos inter-relacionados dentro do sistema maior, de dimensão regional. Obteve-se uma delimitação geográfica preliminar desses subtipos e da área efetiva do aquífero. As fichas de poços perfurados pelas empresas da Mauerberg, Fuad Rassi e da CERB foram fundamentais para essa caracterização, pela disponibilidade de perfis litológicos, construtivos, entre outras informações.

Trabalhos anteriores desenvolvidos na região também serviram de base para a definição do SAU, sobretudo pelos estudos de Nascimento (2003), Amorim Jr & Lima (2003), Schuster *et al.* (2002), Nascimento (2002), Schuster (2003).

### **2.4.3 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos**

Os parâmetros hidrodinâmicos fornecem informações sobre o comportamento hidráulico das unidades aquíferas dentro do sistema, que no Sistema Aquífero Urucuia são representadas pelos arenitos eólicos do Grupo Urucuia. Essas informações refletem o tamanho, arranjo e interconexão entre os grãos da rocha das unidades aquíferas, combinado com a influência do relevo no fluxo subterrâneo.

A obtenção desses parâmetros para o desenvolvimento desta etapa da pesquisa contou com os dados disponíveis em relatórios de poços perfurados pelas empresas de perfuração Mauerberg, Fuad Rassi na região, e alguns do cadastro da CERB. Desses relatórios foram obtidos os perfis litológicos da seqüência sedimentar, que fornecem as espessuras e descrição das camadas interceptadas; perfis construtivos dos poços, revestimentos, posição de filtros; níveis estático e dinâmico, e testes de bombeamento que compõem o cadastro deste trabalho.

Esse cadastro consiste de um conjunto de informações de 361 poços, sendo 257 disponibilizados de cadastro de terceiros (SRH-BA, CERB, Mauerberg, Fuad Rassi) e 104 de informações obtidas em campo, junto às empresas e fazendas. O cadastro da CERB contou com cerca de 700 poços, entretanto, apenas 142 foram utilizados diretamente nesta pesquisa.

A determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos incluiu o uso de dados de testes de bombeamento disponibilizados pelas empresas. Esses dados de testes de bombeamento fornecidos pelas empresas consistem de teste de poço ou de produção, ou seja, as medições do rebaixamento do nível d'água foram feitas no próprio poço bombeado. Essa prática não é ideal para a obtenção dos parâmetros do aquífero, uma vez que o teste de aquífero que deveria ser utilizado para este fim, utiliza pelo menos um poço de observação para a obtenção dos parâmetros do aquífero. Portanto, utilizou-se um poço com características iguais ao bombeado, afastado a uma distância do mesmo valor do raio do poço bombeado, para simular a presença do poço piezométrico. Apesar de não ser o ideal, essa prática é comum nas pesquisas, devido a corrente dificuldade de realização e da não disponibilidade de dados de testes de aquífero.

Esses dados foram processados e interpretados no *software* Aquifer Test Pro 3.5®, da Waterloo Hydrogeologic Inc. Os métodos de interpretação utilizados para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos foram os seguintes: Neuman (1975), Theis (1935) e Cooper & Jacob (1946), assim como a confecção de gráficos de rebaixamento versus tempo de bombeamento.

O processo de análise matemática desses diversos métodos de interpretação do comportamento do fluxo subterrâneo baseia-se nos fundamentos da Lei de Darcy (equação 1)

associado aos princípios de conservação de massa e energia (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 1994).

A lei que descreve o fluxo subterrâneo, conhecida como *Lei de Darcy*, foi anunciada por Henry Darcy em 1856, que conduziu uma série de experimentos sobre o movimento da água em meio poroso e constatou experimentalmente que a vazão entre dois pontos é proporcional a diferença de carga hidráulica,  $h$ , numa seção de área  $A$ , e inversamente proporcional à distância,  $L$ , entre esses pontos (Castany 1963; Freeze & Cherry 1979; Driscoll 1986).

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{Equação 1}$$

Na equação 1,  $Q$  é a vazão,  $A$  é a área da seção considerada ( $m^2$ ),  $h_1 - h_2 / L$  é o *gradiente hidráulico* ( $i$ ), ou seja a diferença de carga hidráulica por unidade de comprimento; e,  $K$  é uma constante de proporcionalidade denominada *condutividade hidráulica*.

Os métodos de interpretação utilizados para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos por meio de ensaios de bombeamento assumem as suposições gerais apresentadas abaixo, além de outras específicas para cada tipo de aquífero considerado (Fetter 1994).

- a) O aquífero é limitado na base por uma camada confinante;
- b) Todas as formações geológicas são horizontais e de extensão infinita;
- c) A superfície potenciométrica do aquífero é horizontal antes do início do bombeamento;
- d) A superfície potenciométrica do aquífero não muda antes do início do bombeamento;
- e) Todas as mudanças na posição da superfície potenciométrica são devidas apenas ao efeito do bombeamento;
- f) O aquífero é homogêneo e isotrópico;
- g) Todo o fluxo é radial em direção ao poço;
- h) O fluxo subterrâneo é horizontal;
- i) A Lei de Darcy é válida;
- j) A água subterrânea tem densidade de viscosidade constante;
- l) Os poços bombeados e observados são totalmente penetrantes no aquífero;
- m) O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal e é 100% eficiente.

#### *2.4.3.1 Aquífero Confinado*

O método de Theis (1935), considerado como um avanço nos estudos de hidráulica de poços, considerou pela primeira vez matematicamente os efeitos do rebaixamento progressivo



em um aquífero confinado, ou seja, o bombeamento em regime transitório (Castany 1963, Driscoll 1986, Fetter 1994).

Theis (1935) assumiu que:

- O aquífero é homogêneo e hidrológicamente isotrópico;
- O aquífero é confinado e tem extensão areal infinita;
- A transmissividade é sempre constante em todos os pontos do aquífero;
- O poço é totalmente penetrante no aquífero, bombeado a uma taxa constante;
- A água removida do armazenamento do aquífero é instantaneamente descarregada no poço pela diminuição de carga hidráulica;
- Toda água removida do poço vem do armazenamento do aquífero;
- O fluxo é laminar no poço e no aquífero;
- A superfície potenciométrica é horizontal antes do início do bombeamento;

Com base nessas condições de contorno específicas, de bombeamento em regime transitório, num aquífero confinado não drenante, o resultado da equação de Theis é:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

$Q$  é a vazão de bombeamento;

$T$  é a transmissividade do aquífero;

$s$  é o rebaixamento a uma distância  $r$  do poço bombeado;

$S$  é o coeficiente de armazenamento;

$t$  é o tempo a partir do início do bombeamento;

$r$  é a distância do poço bombeado até o ponto de rebaixamento.

O termo  $\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$  é a função do poço, representada simplificada por  $W(u)$ . A equação de Theis pode então ser apresentada:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u) \quad \text{Equação 3}$$

O método Cooper-Jacob (1946) é uma simplificação do método de Theis, válido para grandes valores de tempo e decréscimo da distância do poço bombeado, ou seja, valores muito pequenos de  $u$  ( $u < 0,01$ ). Os autores constataram que os dois primeiros termos da equação de Theis eram suficientes para representar um valor confiável da função  $W(u)$ . E a equação de Theis poderia ser aproximada para:

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} [-0,5772 - \ln u], \text{ que da simplificação obtém-se:}$$

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad \text{Equação 4}$$

No cálculo de  $T$  utiliza-se a equação de uma reta ( $y = a \log x + b$ ) formada pelos pontos plotados no gráfico monolog do rebaixamento *versus* tempo ( $s$  x  $\log t$ ). Reescrevendo a equação 4 tal como a equação de uma reta, tem-se que  $a = 0,183Q/T$ , que representa o coeficiente angular da reta ( $\tan \alpha$ ),  $\alpha$  é a inclinação da reta.

$$S = \frac{0,183Q}{T} (\log \frac{2,25T}{r^2 S} + \log t) \quad \text{Equação 5}$$

#### 2.4.3.2 Aquífero Livre

Os aquíferos livres ou não confinados são considerados como os mais complexos em termos de análise do comportamento do fluxo, uma vez que durante o bombeamento ocorre uma redução na espessura saturada do aquífero e o surgimento de componentes verticais do fluxo.

Neuman (1972) apresentou a proposta de um novo modelo analítico para o processo de resposta retardada na caracterização do fluxo para um poço num aquífero não-confinado. Em seu desenvolvimento teórico considerou:

- O aquífero é não-confinado, de extensão lateral infinita que repousa sobre uma camada horizontal impermeável;
- O material do aquífero é homogêneo, mas anisotrópico;
- Um poço completamente penetrante no aquífero, explora água a uma vazão constante  $Q$ ;
- A água é liberada do armazenamento por compactação do material do aquífero, pela expansão da água e pela drenagem gravitacional;
- O rebaixamento é obtido em um poço de observação que é completamente penetrante num aquífero não-confinado;

A solução de Neuman (1972), complementada em Neuman (1974) e (1975) divide-se em duas partes: uma para o tempo logo após o início do bombeamento, quando a água provém do armazenamento; e outra depois de decorrido algum tempo, quando a água está sendo liberada pela drenagem dos poros e o armazenamento é igual a capacidade específica ( $S_y$ ).

$$s = \frac{Q}{4\pi \cdot T} W(u_A, u_B, \beta) \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $W = (u_A, u_B, \beta)$  é a *função do poço* para aquíferos não confinados, com valores tabelados. O termo  $u_A$  refere-se aos rebaixamentos do início do ensaio (equação 7), o termo  $u_B$  aos rebaixamentos posteriores (equação 8), e o termo  $\beta$  (equação 9) relaciona as condutividades hidráulicas vertical  $K_v$  e horizontal  $K_h$ , por meio de  $K_D$ , que representa o grau de anisotropia ( $K_D = K_v/K_h$ ), com a distância do poço bombeado ( $r$ ) e a espessura saturada do aquífero ( $b$ ) (Neuman 1975).

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad \text{Equação 7}$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad \text{Equação 8}$$

$$\beta = \frac{K_D r^2}{b^2} \quad \text{Equação 9}$$

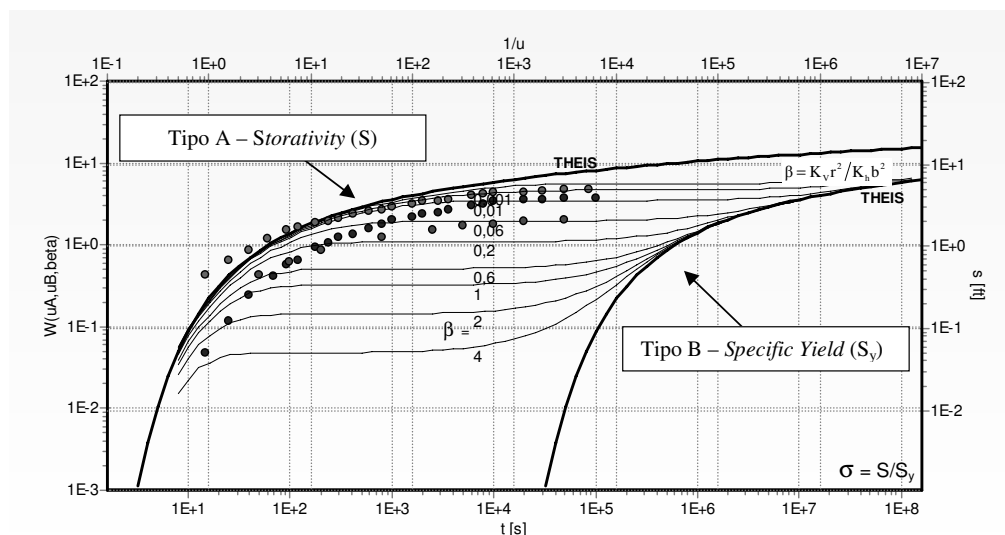
O gráfico da figura 2.3 apresenta um exemplo da aplicação do método de Neuman. Segundo a descrição clássica apresentada em Neuman (1972) podem ser reconhecidos três seguimentos na curva do rebaixamento versus tempo. As curvas do tipo A são aplicadas nos dados de rebaixamento dos primeiros instantes do bombeamento, quando a água é liberada do armazenamento, enquanto que as curvas do tipo B são utilizadas para valores de rebaixamento finais, quando os efeitos da drenagem gravitacional tornam-se mais significante. Ambas as famílias de curvas aproximam-se por um conjunto de assíptotas, que dependem do valor de  $\sigma$  ( $\sigma = S/S_y$ ).

Nos primeiros instantes do início do bombeamento, essa curva, representada por um segmento mais inclinado, encaixa-se na solução de Theis, e indica, portanto, que a água é liberada do armazenamento apenas pela compactação do material do aquífero e pela expansão da água. O período de tempo ocupado pelo primeiro segmento da curva torna-se menor a medida que  $\sigma$  decresce, ou seja, quanto maior for  $S_y$  em relação a  $S$ .

Durante o segundo estágio, a drenagem gravitacional torna-se importante, e seu efeito é similar a uma drenança a partir de uma fonte próxima. Quanto menor o valor de  $\sigma$ , maior é o efeito da drenagem gravitacional, e, portanto mais pronunciada é a drenança. Nesse estágio a curva desvia da solução Theis, uma vez que existem fluxos verticais na parte superior do aquífero, e o segmento da curva torna-se achatado.

Com o aumento do tempo de bombeamento, o efeito do armazenamento elástico no ponto considerado dissipa completamente. Esse terceiro segmento, que segundo Walton (1960) *apud* Neuman (1972), pode iniciar de alguns minutos a vários dias depois do início do bombeamento,

dependendo das condições do aquífero, representa o período durante o qual, a curva rebaixamento versus tempo torna-se novamente paralela à solução de Theis, voltando a apresentar uma de segmento inclinado.



**Figura 2.3** – Exemplo de gráfico utilizado para interpretação de dados de aquífero livre pelo método de Neuman (1975), no software *Aquifer Test Pro 3.5*®.

#### 2.4.4 Elaboração do Balanço Hidrogeológico

O fundamento básico para a realização do balanço hidrogeológico é considerar uma área que represente seu sistema físico de avaliação, e definir variáveis de entrada e saída do sistema.

Neste estudo definiu-se primeiramente o sistema que seria objeto do balanço hídrico. A seleção considerou principalmente a disponibilidade de estações meteorológicas, e fluviométricas nos rios e contou com o auxílio de imagens de satélites Landsat 7 ETM, nas bandas 3, 4, 5 e 8, do ano de 2002; e, cartas topográficas da região.

O sistema foi analisado considerando o princípio da conservação de massa, onde a diferença entre os volumes de entrada e saída é igual à variação do armazenamento de água dentro desse sistema (equação 10). Quando este se encontra em equilíbrio a variação do armazenamento é nula e pode-se isolar quaisquer das variáveis.

$$P - I - Q - ET = \frac{dS}{dt} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$P$  – é a precipitação pluviométrica sobre a área do sistema;  
 $I$  – é a infiltração;

$Q$  – vazão total de saída do sistema;

$ET$  – evapotranspiração na área do sistema.

$\frac{dS}{dt}$  – variação do armazenamento dentro do sistema

Posteriormente, com base nesses fundamentos, foram definidas as variáveis teóricas, simplificações e formas de obtenção. As variáveis consideradas no balanço são, em linhas gerais, as seguintes:

ENTRADA	SAÍDA
Precipitação ( $P$ ) Infiltração no solo ( $I_s$ ) Infiltração na zona saturada ( $I_{zs}$ ) Água importada ( $A_i$ )	Evapotranspiração ( $ET$ ) Escoamento superficial ( $E_s$ ) Interfluxo ( $Q_i$ ) Fluxo de base ( $Q_b$ ) Vazão explotada de poços ( $Q_p$ )

A precipitação ( $P$ ) foi adquirida diretamente das estações meteorológicas, onde os dados foram cedidos pelo INMET, além de dados medidos em algumas fazendas da área selecionada.

A evapotranspiração ( $ET$ ) obtida matematicamente pelo método de Thornthwaite (1948) em D'Angiolella & Vasconcellos (2004), e a infiltração ( $I$ ) matematicamente, por meio de fórmulas empíricas.

A evapotranspiração potencial (ETP), termo analisado por Thornthwaite (1948) como o volume de água evaporado da superfície do solo e transpirado pelas plantas numa área bem vegetada e com superávit hídrico, foi obtida matematicamente, por meio de fórmulas empíricas, entretanto não considerada neste balanço, uma vez que as condições de definição da ETP sempre superestimam a realidade. Esses valores são sempre superiores a evapotranspiração real e inferiores aos valores de evaporação direta (por exemplo, medidos em evaporímetros do tipo Tanque Classe A). Na prática a evapotranspiração potencial representa o limite superior de quantidade de água que o ecossistema pode perder por evapotranspiração (Fetter 1994). A variável utilizada foi a ETR (evapotranspiração real).

O escoamento superficial ( $E_s$ ) e o interfluxo ( $Q_i$ ) serão tratados como uma única variável, pela impossibilidade de separação, e representarão a variável ( $E$ ). Juntamente com o fluxo ou vazão de base ( $Q_b$ ) foram obtidos a partir do hidrograma da bacia selecionada, construído pelos valores obtidos no monitoramento das vazões ao longo do tempo, nas estações fluviométricas da área selecionada, obtidas junto ao sistema de informações da ANA. Os hidrogramas foram confeccionados no *software* Maple 7.0®, da *Waterloo Maple Inc.*, por interpolação polinomial e os volumes correspondentes de cada parcela calculada pela integração da curva obtida.

### 2.4.5 Estimativa das Reservas Hídricas Subterrâneas

A estimativa das reservas hídricas subterrâneas mostrou-se um importante passo no conhecimento do SAU. Esse parâmetro de avaliação da potencialidade do sistema aquífero é um valioso instrumento para a gestão dos recursos hídricos.

Essa avaliação baseou-se em fórmulas clássicas de obtenção dos diferentes tipos de reservas: reservas renováveis ou reguladoras, reservas permanentes ou seculares e reservas exploráveis (Costa 2000).

As *reservas renováveis* ( $R_r$ ) consistem do volume de água do aquífero acumulado por alimentação natural (precipitação) no ano hidrológico. Esse volume é diretamente dependente do regime de precipitação, e pode variar anualmente tanto em função da precipitação como das condições de uso do solo, que podem acarretar mudanças no volume infiltrado. O cálculo da reserva renovável foi feito com base na observação da oscilação do nível freático ao longo de um ano.

A utilização da variação do nível de água nos poços ao longo de um ano hidrológico permitiu, de forma preliminar, uma determinação da oscilação do nível ( $\Delta h$ , em metros) e, juntamente com o valor da porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) do aquífero e da área de ocorrência do aquífero ( $A$ , em  $m^2$ ), a determinação da reserva renovável ( $m^3/ano$ ), por meio da relação:

$$R_r = A \cdot \eta_e \cdot \Delta h \quad \text{Equação 11}$$

As *reservas permanentes* ( $R_p$ ) são aquelas situadas abaixo do nível de água mínimo, medido no período de estiagem, e não sofrem influência da sazonalidade. O cálculo da reserva permanente depende do tipo de aquífero avaliado.

Nos aquíferos intergranulares confinados corresponde a soma do volume armazenado sob pressão ( $V_p$ ) com o de saturação ( $V_s$ ) (equação 12). Enquanto que nos aquíferos intergranulares não confinados a reserva permanente é igual ao volume de saturação (equação 13).

Aquíferos intergranulares confinados      Aquíferos intergranulares não confinados

$$R_p = V_s + V_p \quad \text{Equação 12} \quad R_p = V_s \quad \text{Equação 13}$$

$$\text{Onde: } V_s = A \cdot b \cdot \eta_e \quad V_p = A_p \cdot h \cdot S$$

$A$  - área de ocorrência do aquífero;  
 $b$  - espessura saturada do aquífero;  
 $\eta_e$  - porosidade efetiva.  
 $A_p$  - área de confinamento do aquífero;  
 $h$  - carga hidráulica média;  
 $S$  - coeficiente de armazenamento.

A reserva explorável ( $R_{exp}$ ), por sua vez, representa o volume total de água que pode ser explorado do aquífero para a sustentabilidade do sistema, ou seja, sem causar o rebaixamento progressivo dos níveis de saturação (equação 14). Normalmente representa a reserva reguladora somada com uma parte do volume da reserva permanente.

$$R_{exp} = Rr + x \cdot Rp \quad \text{Equação 14}$$

Onde:  $Rr$  é a reserva renovável;  $Rp$  é a reserva permanente; e,  $x$ , é um percentual da reserva permanente.