

MODELO DE SIMULAÇÃO DIGITAL DO AQUÍFERO CÁRSTICO DO JAÍBA*

Waldemir Barbosa da Cruz**
Adelbani Braz da Silva**

* Trabalho realizado com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq

** Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC

RESUMÉ

La région karstique de la Jaíba, au nord de Minas Gerais est l'objet d'une série d'études et de recherches hydrologiques qui ont pour but évaluer et comparer diverses techniques de prospection d'eau souterraines dans ce cas particulier de nappe phréatique. Au cours de ces études un modèle mathématique de la nappe a été élaboré ayant pour but la vérification des données obtenues, de hypothèses de travail, l'orientation de la direction des recherches et la détermination des limitations possibles quant à l'application du modèle dans les conditions particulières du Karst.

Le modèle SIDA de Alvarez fut utilisé pour simuler le comportement de la nappe, ce modèle est une adaptation de celui décrit par Prickett et Lonquist. Pour calibrer le modèle sont utilisées des données du bilan et les variations des niveaux piézométriques observées durant la période d'octobre 1977 à Mai 1980 pour 32 piézomètres. Les tests effectués ont permis d'évaluer la valeur régionale des paramètres hydrodynamiques de la nappe, estimés ou obtenus au cours des essais de pompages, ainsi que les estimations des coefficients d'infiltration.

INTRODUÇÃO

A região carstica do Jaíba, ao norte do Estado de Minas Gerais, vem sendo alvo de uma série de estudos e pesquisas hidrogeológicas, que visam avaliar e comparar diversas técnicas de prospecção de água subterrânea neste tipo particular de aquífero (CETEC, 1979).

No âmbito destes estudos, foi elaborada uma modelagem matemática do aquífero com o objetivo de testar a validade de dados obtidos e de hipóteses de trabalho, orientar o planejamento das pesquisas, e de terminar possíveis limitações quanto à aplicação do modelo para as condições especiais do "Karst".

Neste trabalho são descritos os principais aspectos do modelo, as condições impostas para a simulação do aquífero e os principais resultados obtidos na fase preliminar de ajuste.

CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Para simular o comportamento do aquífero foi utilizado o modelo SIDA (Simulação Digital de Aquífero) de Alvarez (1976). Este modelo, que é uma modificação do descrito por Prickett e Lonquist (1971), apresenta as seguintes características:

- A resolução da equação fundamental de fluxo subterrâneo é feita por diferenças finitas segundo o método iterativo implícito em direção alternante de Peaceman-Rachford, que consiste em calcular, para cada iteração, primeiro o valor de h para cada coluna e, em seguida, para cada fila.

- O modelo é de malhas variáveis, compreendidas num reticulado de 30 x 30 malhas, e simula em regime transitório, a evolução piezométrica do aquífero no curso do tempo, em todos os nós, de maneira cíclica mensal.
- Os limites do modelo podem ser impermeáveis ou abertos. Os valores das vazões de entradas ou saídas laterais são calculados malha por malha, a nível mensal e anual.
- A simulação de bombeamento, assim como a da recarga direta do aquífero através de infiltração de chuva, pode processar-se em todas as malhas do modelo. Esses dados são fornecidos, mês a mês, para a duração total da simulação, supondo-se uma repartição uniforme ao longo do mês, ou seja, consideram-se valores médios mensais.
- Podem-se simular as trocas de água entre o aquífero e os rios através das equações:

$$QR = \frac{K'A'}{m} (Rh - h) \text{ para } h > Rd$$

$$QR = \frac{K'A'}{m} (Rh - Rd) \text{ para } h < Rd$$

onde

Rh = Cota de água no rio

Rd = Cota do leito do rio

K' = Permeabilidade do fundo do rio

m = Espessura da camada de colmatação do fundo do rio

A' = Área dentro da malha (i,j) através da qual pode ocorrer infiltração

h = Nível piezométrico na malha (i,j).

Os valores de descarga do aquífero ao rio ou do rio para o aquífero são fornecidos pelo modelo, malha por malha, para cada mês, assim como anualmente.

- As trocas de água com outro aquífero, através de um "aquitard" podem ser simuladas, da mesma maneira, através da equação:

$$QIS = \frac{K'A'}{m} (h - Rh)$$

onde

Rh = Nível piezométrico do aquífero conexo na malha (i,j)

K' = Permeabilidade do "aquitard"

m = Espessura do "aquitard"

A' = Área do trecho da malha no qual existe fluxo vertical

h = Nível piezométrico do aquífero simulado, na malha (i,j).

- Os resultados são apresentados numa tabela que indica malha por malha, a cota do nível d'água no nó considerado, para cada mês; as saídas ou entradas laterais de água do modelo; e para um certo nó desejado, a evolução piezométrica ao término de cada ano do período simulado.

A área do aquífero simulada no modelo situa-se entre os rios São Francisco e Verde Grande, ao norte da Serra do Sabonetal (Fig. 1), abrangendo uma área de 5.150 km². Trata-se de uma região aplainada, cujos desníveis topográficos não ultrapassam, geralmente, a 50 metros acima das cotas da planície aluvial do rio São Francisco, em torno de 440 metros. Sobressaem-se no relevo suave apenas a Serra do Sabonetal e a Serra Azul, ao sul, com elevações de 840 e 720 metros de altitude, respectivamente, e o Morro do Catarino, ao norte, com cota máxima de 598 metros.

A área é constituída de uma sequência calcárea, pertencente ao Grupo Bambuí do Eocambriano, que repousa diretamente sobre o embasamento cristalino precambriano. Estas rochas calcáreas são recobertas, em grande parte da área, por capeamento detrítico terciário-quadernário e por aluviões recentes ao longo dos vales dos rios São Francisco e Verde Grande (Fig. 1).

Do ponto de vista estrutural, esta área corresponde a um bloco rebaixado por falhamento paralelo ao rio São Francisco, onde afloram as unidades da seção superior do Grupo Bambuí. O aleitamento dos calcários é sub-horizontal, sendo afetado somente por suaves movimentos de fundo de bacia, traduzidos em grandes fraturas nas direções preferenciais N 40-50° W e N 30-40° E.

A carstificação cenozóica produziu estruturas típicas, sendo a feição mais marcante a densidade de dolinas, algumas orientadas segundo as direções das fraturas.

As características litológicas e estruturais das unidades de rocha são bem conhecidas à superfície, a partir do mapeamento realizado na escala 1:100.000 (Costa, 1978). Faltam, todavia, maiores informações de sub-superfície, devido à ausência de perfis de poços bem descritos e controlados.

A espessura da sequência calcária e a profundidade do substrato cristalino não são conhecidas. A profundidade de carstificação não ultrapassa, em geral, a 100 metros, com a maior parte das fissuras em torno de 30-40 metros de profundidade, algo acima do atual nível do rio São Francisco, conforme sugerem as perfilagens isotópicas realizadas em 48 poços tubulares da área (Plata, 1978; Silva, 1979).

O capeamento detrítico terciário-quadernário é pouco espesso, mas alcança, em algumas áreas, espessuras consideráveis de até 15 metros, com valor máximo de 65 metros, de acordo com perfis de eletrorresistividade e dados de poços (Escodino, 1979).

A superfície piezométrica mostra dois altos correspondentes à Serra do Sabonetal (gradiente hidráulico entre 0,005 e 0,003) e ao Morro do Catarino (gradiente hidráulico entre 0,004 e 0,002) e parece indicar um suave divisor de águas na direção N-S entre o rio São Francisco e o Verde Grande. O escoamento subterrâneo, a partir deste divisor, se daria para o São Francisco, a oeste, e para o rio Verde Grande, a leste, com gradientes muito fracos (0,0004 a 0,00005). Devido à pouca precisão das medidas altimétricas (± 1 metro) e à escassez de pontos de medida na área central e, por outro lado, à falta de evidências de descargas importantes do aquífero ao rio Verde Grande, pode-se considerar também a hipótese da ausência deste divisor de águas e uma possível desconexão do aquífero com o rio Verde Grande, especialmente em trechos à jusante da Colônia do Jaíba, onde o rio teria caráter influente. Nesta hipótese, que necessita ainda de confirmação, o escoamento se processaria desde fora dos limites da área, a leste, segundo uma inclinação geral para o vale do rio São Francisco.

As variações piezométricas estacionais, atingem, na maior parte da área, valores inferiores a 5 metros. No Morro do Catarino e ao sul, na Serra do Sabonetal, estas variações são acentuadas, ultrapassando do 10-15 metros, com máximo de 36 metros.

As características hidrodinâmicas do aquífero foram avaliadas a partir de 37 testes de bombeamento. O valor médio de transmissividade é de 150 m²/dia. Considerando os resultados acima de 300 m²/dia, a média é de 539 m²/dia e, para os valores abaixo de 300 m²/dia, a média é de 47 m²/dia.

Deve-se ressaltar que estes resultados não podem ser extrapolados para áreas extensas porque os valores encontrados refletem as condições

ções ao redor do poço. Por outro lado, os valores de transmissividade não devem corresponder aos valores médios destes aquíferos, haja visto a localização privilegiada da maioria dos poços testados, em relação ao restante da área de ocorrência (Silva, 1979).

Alguns valores de transmissividade e porosidade eficaz foram determinados por testes com traçadores radioativos (Plata, 1978) mas mostram certa incoerência com os obtidos nos testes de bombeamento.

O conhecimento sobre a recarga do aquífero é insuficiente. Com base no balanço de saídas de água do aquífero, não é possível estimar a recarga, posto que as descargas ao São Francisco não podem ser medidas por incrementos de vazão do rio, no trecho, enquanto as possíveis saídas ao rio Verde Grande, se existentes, são muito pequenas e não podem ser medidas com garantia.

CONDIÇÕES DO MODELO DO AQUÍFERO

Discretização do Aquífero e Condições de Contorno

A área do aquífero selecionada para simulação limita-se a oeste pelo rio São Francisco; ao norte e a leste pelo rio Verde Grande e ao sul pela Serra do Sabonetal.

A discretização espacial do aquífero foi efetuada segundo malhas quadradas de 5 x 5 km, distribuídas em 13 colunas (NC=13) e 19 fileiras (NR=19), perfazendo um total de 206 malhas. Como as direções de fluxo, no modelo, são ortogonais, as malhas foram aproximadamente orientadas segundo as direções dos fraturamentos dominantes N 40°E e N 50°W que devem corresponder a zonas preferenciais de fluxo.

No limite oeste, balizado pelo rio São Francisco, foram impostas condições de potencial constante. O limite sul, que corresponde a um divisor de águas permanente marcado pela Serra do Sabonetal, foi considerado como bordo impermeável. Para os limites norte e leste, podem ser admitidas duas hipóteses: ou o rio Verde Grande mantém conexão permanente com o aquífero e constitui um limite de potencial constante ou, por outro lado, os níveis piezométricos do aquífero têm cota inferior ao do rio, que assumiria, neste caso, caráter influente e perderia água para o aquífero. Esta situação parece ocorrer especialmente em trechos a jusante da Colônia do Jaíba até a desembocadura no rio São Francisco, onde há possibilidades de pequenas perdas de água do rio, conforme sugerem as observações hidrométricas.

Para a primeira fase do modelo, considerando o caráter permanente do rio Verde Grande e a incerteza desta última interpretação, foi admitido um limite a potencial constante para o rio Verde Grande.

Condições Iniciais e Períodos de Simulação

As condições iniciais da simulação são definidas pela piezometria de outubro de 1977, final do período de estiagem. As ações exteriores ao sistema, como as infiltrações e bombeamentos, são incorporadas mensalmente, em termos médios e os resultados são apresentados, mês a mês, por um período total de simulação de 2 a 4 anos.

Características Hidrodinâmicas

As características hidrodinâmicas do sistema aquífero foram avaliadas, experimentalmente, a partir de uma série de testes de aquífero por bombeamento (37 testes) e por perfilagem isotópica de poços (Silva, 1979; Plata et alii, 1978). Os resultados obtidos em ambos os métodos mostram correspondência, em certos casos, e discrepância em outros, mas observa-se uma variabilidade muito grande de local a local, evidenciando uma forte anisotropia do sistema, quando analisado em termos pontuais ou locais, como nos testes de campo. Há muita incerteza sobre a magnitude dos valores médios, representativos do conjunto do aquífero, em termos regionais. Nestas condições, os parâmetros hidrodinâmicos do sistema serão variáveis a serem consideradas nos ajustes e testes do modelo.

Infiltração e Bombeamento

A recarga do aquífero, devido às dificuldades de uma estimativa confiável, a partir do conhecimento das saídas ou descargas aos rios, foi estabelecida com base no balanço de cloretos. Foram admitidas zonas distintas com taxa de infiltração de 0,5 e 2% em relação à pluviometria média mensal sobre a área. As descargas por bombeamento, por serem de pequena expressão ($< 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$), não foram consideradas no modelo.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados oito testes de calibração e ajuste do modelo. Os quatro primeiros testes corresponderam a uma primeira fase, onde se pretendeu investigar a coerência dos dados originais e sensibilidade dos parâmetros envolvidos. Os quatro últimos testes fazem parte de uma segunda fase onde se procura ajustar as tendências das variações dos níveis d'água no espaço e no tempo. Dependendo dos resultados alcançados para as condições particulares do "Karst", será realizada uma terceira fase de ajustes que se destinará a reduzir ao mínimo as diferenças entre os níveis observados e os calculados.

A elaboração de um modelo que reflita perfeitamente a realidade do aquífero encontra, no caso específico do "Karst" do Jaíba, uma série de dificuldades que podem ser assim resumidas:

- Dificuldade de se obter um balanço hídrico confiável. Com efeito, não é possível medir nenhum incremento de vazão no rio São Francisco, para onde deve sair a maior parte da descarga subterrânea, enquanto que, no rio Verde Grande, a contribuição subterrânea, se existente, é pequena e não pode ser medida com segurança.
- As estimativas de infiltração nos aquíferos representam, em geral, cifras apenas aproximadas. No caso do "Karst" do Jaíba, como não se conhecem as saídas aos rios, a infiltração foi estimada com base no balanço de cloretos, que abriga muita incerteza, especialmente devido ao pequeno número de determinações deste íon nas águas de chuva.
- As determinações das transmissividades obtidas dos testes de bombeamento e as estimativas dos coeficientes de armazenamento podem ser válidas apenas para a área em torno do poço, não tendo representatividade regional. Em outras palavras, podem haver grandes diferenças entre dados pontuais e médias regionais, no que se refere aos parâmetros hidrodinâmicos que comandam o funcionamento do aquífero.
- Incerteza quanto ao grau de uniformidade das ações exteriores ao sistema - infiltração - e quanto à maneira como o aquífero responde a estas variações. Se as condições de infiltração no aquífero são bastante variáveis de um ano a outro, dependendo da distribuição espacial e temporal da precipitação, as respostas do aquífero tendem a um certo grau de desestabilização e a um regime não uniforme. Como consequência, haverá grande diferença entre as condições da série histórica com os dados iniciais impostos ao modelo, em especial quando se dispõe unicamente de séries muito curtas, inferiores a 5 anos.
- Dificuldades de se obter um modelo confiável do aquífero para fins de simulação de exploração. Esta dificuldade adicional decorre do fato de que, não havendo praticamente exploração do aquífero, o ajuste será realizado para um estado do aquífero distinto daquele que se pretende simular.

Tendo em conta estas dificuldades, os primeiros testes tiveram como objetivo verificar a validade das hipóteses admitidas e a representatividade regional dos dados originais. Para controle do modelo, dispõem-se dos dados de balanço hídrico e das variações piezométricas medidas em uma rede de poços de observação. Esta rede incluiu, inicialmente, 73 poços cujas medições foram efetuadas desde outubro de 1977 até maio

de 1979. A partir desta data, foram selecionados apenas 32 poços que continuam em operação, com medições mensais ou bimensais.

No quadro 1 constam as condições impostas na simulação do aquífero e os resultados obtidos quanto ao balanço hídrico e às amplitudes das variações piezométricas para os testes iniciais.

Os principais resultados destas simulações podem ser assim resumidos:

- No teste nº 1, há grande acumulação de água no aquífero, sendo as saídas de água muito pequenas em relação às entradas. As amplitudes das variações piezométricas variam de 12 a 14 metros nas zonas elevadas, o que mostra razoável coerência com os dados observados, especialmente ao norte, no Morro Catarino. No restante do aquífero, nas zonas aplanadas, as variações piezométricas vão de 9 a 12 metros, em desacordo com as observadas que são, em geral, pequenas na zona central e nas margens do São Francisco e Verde Grande.
- No teste nº 2, onde se pretendeu testar a sensibilidade do valor do coeficiente de armazenamento, manteve-se os mesmos valores do teste anterior, tomando-se, todavia, um valor de $S = 0,01$. As saídas de água pelas malhas exteriores diminuíram sensivelmente, aumentando a diferença do balanço entre as entradas e saídas de água do sistema. Em contrapartida, as amplitudes das variações piezométricas decresceram, apresentando valores da mesma ordem de grandeza, tanto nas zonas planas como nas zonas elevadas - 1,4 a 2,2 metros.
- No teste nº 3 foram admitidos valores de T e S elevados na zona aplanada e pequenos na Serra do Sabonetal e no Morro Catarino, assumindo-se, por outro lado, uma taxa de infiltração igual à metade da considerada nos testes anteriores, ou seja, $I = 1\%$. Obteve-se um resultado mais favorável quanto ao balanço hídrico, mas as variações piezométricas são bastante reduzidas em comparação com as medidas na rede básica de poços de observação.
- O teste nº 4 foi orientado no sentido de verificar a influência da recarga nas variações de níveis d'água e no balanço. Para tanto, foram mantidos os mesmos valores de T e S do teste anterior, variando-se, todavia, a infiltração para valores de 10% nas serras e de 4% na zona plana. As amplitudes das variações piezométricas nas serras mostram valores desde 18m a maiores que 20m, aproximados, portanto, aos observados no Morro Catarino, ao norte, onde ocorrem variações acima de 20 metros. Na zona plana, as variações mostram também certa coerência com os dados observados em algumas áreas, mas o aquífero mantém uma acentuada acumulação de água, com os valores de saídas inferiores à metade do volume de entradas.

A análise destes testes preliminares parecem evidenciar os seguintes aspectos:

- Que a infiltração no aquífero é baixa. Valores em torno de 1 a 2% parecem razoáveis, conforme indicam as estimativas baseadas no balanço de cloretos. Infiltrações mais elevadas requeriam valores de T e S muito grandes para se alcançar um equilíbrio no balanço hídrico, o que parece pouco provável;
- Que há diferenças dos valores de T e S entre as zonas central e marginais aos rios com as zonas elevadas do sul (Serra do Sabonetal) e ao norte (Morro Catarino).
- Que os valores de T determinados nos testes não têm grande significado em termos médios regionais.

Em seguida a esta fase, mais quatro testes foram realizados visando ajustar a tendência das variações de níveis d'água no espaço e no tempo. O teste nº 7 representa o estágio mais avançado dos estudos efetuados com o modelo, permitindo definir alguns aspectos importantes do funcionamento do aquífero e evidenciar alguns problemas que dificultam

a obtenção de um modelo representativo da realidade, com os dados atualmente disponíveis.

Os dados de entrada estão indicados na figura 2. Os mapas piezométricos nos tempos $T=30$ dias e $T=1440$ dias ou após 4 anos de simulação estão representados nas figuras 3 e 4. Os resultados do balanço hídrico mensal e anual, no 4º ano de simulação, constam da figura 5. As variações piezométricas simuladas pelo modelo encontram-se confrontadas com as observadas em alguns poços, na figura 6.

Da análise dos resultados deste teste, podem ser feitas as seguintes observações:

- O balanço hídrico apresenta-se próximo ao equilíbrio no 4º ano de simulação, com uma diferença para menos quanto às saídas de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Como há uma pequena acumulação de água no aquífero, os níveis d'água mostram ainda pequena elevação, em quase todas as malhas.
- Em algumas zonas, como nas Serras do Sabonetal, Morro Catarino e margens do rio São Francisco há boa correspondência quanto às tendências das variações dos níveis d'água, em termos temporais, necessitando de algumas modificações para ajustar a amplitude destas variações.
- A comparação entre a superfície piezométrica inicial e a simulada ao final do 4º ano ($T = 1140$ dias) evidencia a elevação dos níveis d'água em algumas zonas, como ao sul, próximo ao limite impermeável, em decorrência de acumulação d'água no aquífero. Na zona do Morro Catarino, ao norte, pode-se observar o deslocamento do alto piezométrico, como consequência do ajuste dos dados iniciais dos níveis d'água, efetuado pelo modelo. Os primeiros intervalos de tempo simulados, especialmente no 1º ano, não são muito precisos, uma vez que o modelo está compensando os erros da falta de equilíbrio do estado inicial dos níveis d'água com as condições hidrogeológicas e geométricas impostas.
- As saídas d'água pelas malhas exteriores indicam que as descargas do aquífero ao rio São Francisco são de $14,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, o que equivale a uma vazão contínua de apenas $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$, evidentemente, muito pequena em relação ao deflúvio do rio nesta área e não detectável. Para o rio Verde Grande, as descargas do aquífero correspondem a $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ no trecho leste e $0,56 \text{ m}^3/\text{s}$ no trecho norte. Considerando as contribuições subterrâneas que ocorrem no período de estiagem, de abril a outubro, para toda a extensão do vale, nos limites norte e leste do modelo, as descargas correspondem somente a $0,34 \text{ m}^3/\text{s}$, o que mostra certa coerência com as vazões de base do rio, em geral, com valores entre 1 a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ e mínimas registradas inferiores a 1 ($0,3$ a $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$).
- A observação do balanço hídrico, expresso na figura 5, mostra que, para as condições impostas ao modelo, o aquífero tem uma grande capacidade reguladora, pois absorve os volumes de águas infiltradas nos 5 primeiros meses do ciclo e somente libera muito lentamente ao longo de todo o ano.

É interessante notar que esta tendência verificou-se em todos os testes efetuados, ocorrendo sempre uma acumulação de água acentuada no aquífero, com subida geral dos níveis e pequeno volume de saídas em relação às entradas. Esta característica do balanço ocorreu mesmo nos testes onde se atribuiu um pequeno valor para o coeficiente de armazenamento. As mesmas condições impostas no teste 7 foram simuladas, em um outro teste, admitindo-se, todavia, valores de T mais altos (em algumas zonas com $T=1000 \text{ m}^2/\text{s}$) na tentativa de melhorar as condições de equilíbrio no balanço hídrico. Os resultados mostraram, para os 4 anos simulados, uma acumulação de água da mesma ordem de grandeza.

Esta acumulação geral de água no aquífero pode estar relacionada à influência dos níveis d'água iniciais e a um regime não uniforme de recarga.

Os níveis d'água iniciais foram obtidos através de medidas pie

zométricas em outubro de 1977. Este período corresponde ao final de uma série de 5 anos secos, com altura pluviométrica anual abaixo da média de modo que a superfície piezométrica do aquífero estaria bastante rebaixada, no tempo $T=0$ do modelo. Os anos seguintes, 1978 e 1979, foram anos excepcionalmente úmidos com alturas pluviométricas anormais.

As medidas de níveis d'água nos poços de observação evidenciam estas condições, sendo notável as variações de reserva de água no aquífero, de um ano para outro, observadas através das elevações de níveis d'água nos hidrogramas. Na maior parte dos poços, verificam-se incrementos acentuados da altura piezométrica ao final do período seco dos anos subsequentes. Com efeito, após o primeiro ano (outubro de 1978) todos os poços de observação, à exceção de dois, mostram incrementos positivos de níveis d'água, a maior parte superior a 1 metro, com máximo de 12 metros. No segundo ano (outubro de 1979), a maior parte dos poços mostrou incrementos superiores a 3 metros, com máximo de 15 metros. Este fato torna evidente que o aquífero mostra variações acentuadas das reservas, como consequência do regime não uniforme de recarga de ano para ano.

Estas observações evidenciam também o aspecto de que o aquífero não tem características essencialmente condutoras e que suas transmissividades não são suficientemente elevadas para provocar uma rápida resposta do aquífero às ações exteriores, ocasionando um rápido esvaziamento. Ao contrário, há uma capacidade de acumulação elevada que permite uma subida acentuada dos níveis d'água e uma variação das reservas plurianuais, ou seja, um aumento do seu armazenamento transitório. Estas observações dos hidrogramas mostram que o balanço hídrico não se verifica necessariamente ao longo de um ano ou de um período de anos sucessivos, sem que sejam consideradas as variações de reserva, o que dificulta sobremodo os ajustes do modelo.

As variações de armazenamento, ou as acumulações de água que ocorrem nos testes realizados, podem ser atribuídas aos valores de T e S admitidos ou ainda ao aquecimento do modelo, ou seja, aos ajustes de níveis d'água iniciais para as condições geométricas e hidrogeológicas impostas. No entanto, deve ser considerada a possibilidade dos efeitos dos níveis de água bastante rebaixados, considerados no estado inicial do modelo. Esta possibilidade colocaria em confronto uma evolução piezométrica real, refletindo condições extremas de um regime de recarga, com uma situação de infiltração imposta, baseada em uma pluviometria média, ou seja, entram em confronto as diferenças existentes entre a série histórica e os dados impostos. Para períodos de simulação curtos, estes aspectos são importantes quando a série histórica reflete fenômenos extremos e os dados impostos referem-se a situações médias.

Kessler (1958, 1965, in Custódio, 1976) tem encontrado, em zonas cársticas da Hungria, que para igual precipitação e na mesma zona, a recarga, medida nos mananciais, pode variar entre 7 e 70% da precipitação, sendo muito importante a distribuição temporal da chuva.

Esta observação coloca em questão a possibilidade de ocorrer grandes variações da taxa de infiltração no aquífero independente da altura pluviométrica. Por outro lado, a maneira como o aquífero reage a estas variações pode ser bastante distinta. Em outras palavras, a resposta do aquífero pode diferir, dependendo da altura da superfície piezométrica em determinado período e das condições de recarga prevalentes em cada ano. Como a anisotropia do sistema é acentuada, o aquífero pode variar também suas características de predominantemente condutor ou regulador, dependendo do regime de recarga e da evolução ou estágio da superfície piezométrica.

Daí a necessidade de se obter séries históricas mais longas superiores a 5 anos de observações.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. O modelo vem sendo útil para orientar o desenvolvimento das pesquisas e avaliar hipóteses de trabalho ou a coerência de dados obtidos.

2. Devido aos dados de controle ainda escassos e ao provável regime não uniforme da recarga, será necessário dar prosseguimento as observações e efetuar novos testes para calibração a fim de melhorar a representatividade do modelo ou verificar sua aplicabilidade às condições particulares do Karst.
3. Seria recomendável estender o limite do modelo para leste e simular as trocas de água entre o aquífero e o rio Verde Grande.

BIBLIOGRAFIA

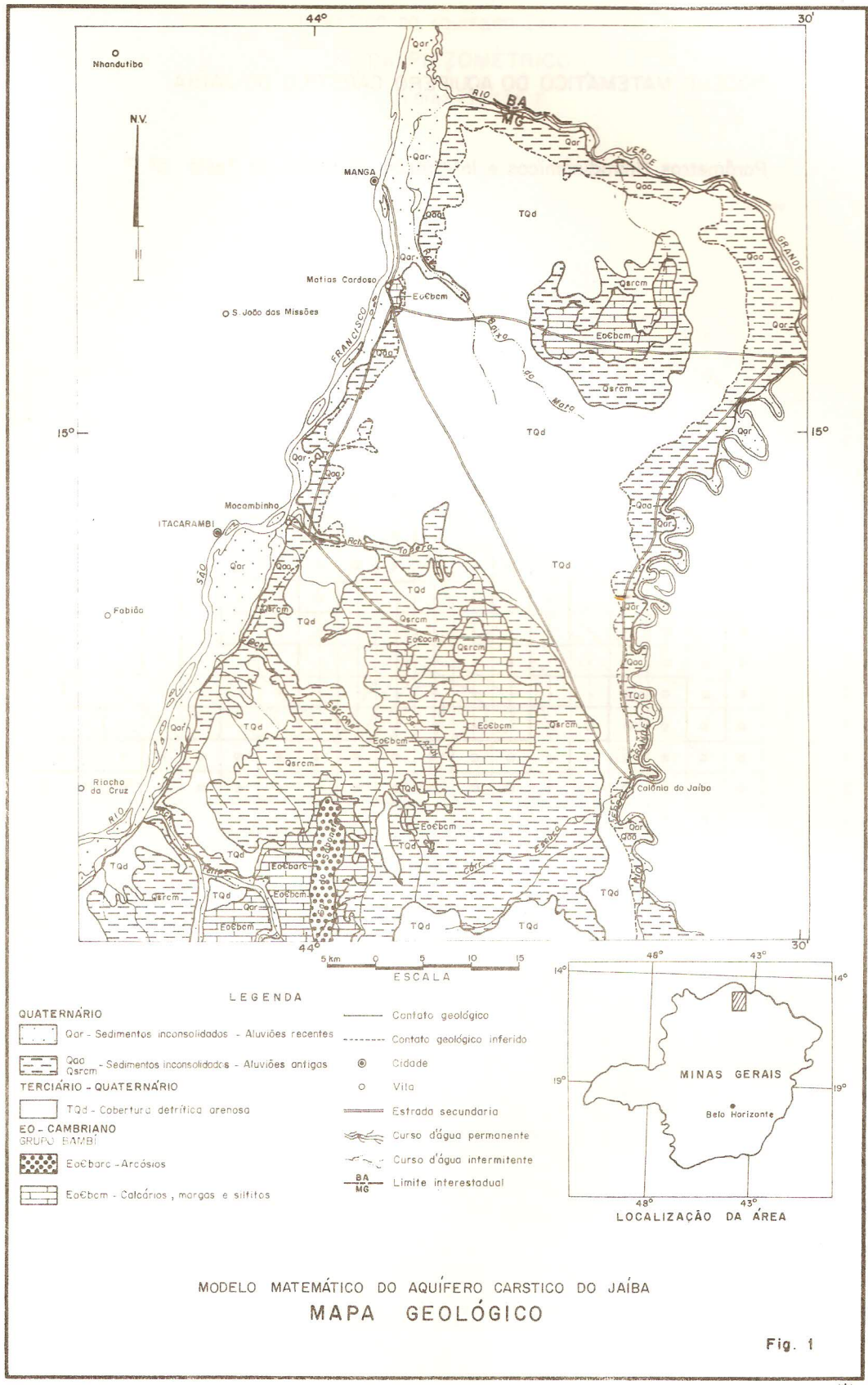
- ALVAREZ, C; CRUZ, W.B; PEIXOTO, C.A.M., 1976 - Modelo matemático do aquífero Beberibe - SUDENE, CONESP-OESA, inédito. Recife.
- CETEC, 1979 - Pesquisa e avaliação de recursos hídricos subterrâneos em Karst por sensores remotos, CETEC nº 1/79 - Belo Horizonte.
- COSTA, P.C.G; 1978 - Geologia das folhas de Januária, Mata da Jaíba, Ja poré e Manga, Minas Gerais - Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife.
- CUSTÓDIO, E; e LLAMAS, M.R., - 1976 - Hidrologia Subterrânea, Tomo II, Ediciones Omega S/A - Barcelona.
- ESCODINO, P.C.B; SILVA, A.B., - Utilização do método elétrico na determinação do capeamento detritico do carste da região do Jaíba, norte de Minas Gerais - CETEC, NT nº 07/79 - Belo Horizonte.
- PLATA, A; SILVA, A.B; ESCODINO, P.C.B., - 1978 - Perfilagem de poços tubulares utilizando-se isótopos artificiais - CETEC. NT. nº 7/78 - Belo Horizonte.
- PRICKETT, T.A; LONQUIST, C.G., 1971 - Selected digital computer techniques for groundwater resources evaluation. Illinois State Water Survey. Bull. 55. Urbana.
- SILVA, A.B; 1979 - Pesquisa e avaliação de recursos hídricos em "Karst" por meio de sensores remotos. Rev. Min. e Met. nº 415 - Rio de Janeiro.

QUADRO 1

MODELO MATEMÁTICO DO AQUIFERO CÁRSTICO DO JAÍBA, MG
RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES PRELIMINARES

TESTE Nº	PARÂMETROS ADOTADOS NA SIMULAÇÃO	BALANÇO (EM $10^6 m^3$)		AMPLITUDES VARIAÇÕES PIEZOMÉTRICAS (m)	
		ENTRADAS	SAÍDAS	PLANO	SERRAS
1	T = 90 m^2 /dia - Plano 9 m^2 /dia - Serras S = 0,001 I = 2 %	74	22	9,8 - 12	12,3 - 14,3
2	T = 90 m^2 /dia - Plano 9 m^2 /dia - Serras S = 0,01 I = 2 %	74	5,5	1,4 - 2,2	1,8 - 2,2
3	T = 500 m^2 /dia - Plano 50 m^2 /dia - Serras S = 0,002 - Serras 0,01 - Plano I = 1 %	36	26	0,2 - 0,5	1,8 - 2,3
4	T = 500 m^2 /dia - Plano 50 m^2 /dia - Serras S = 0,002 - Serra 0,01 - Planos I = 10% - Serras 4 % - Plano	167	75	0,54 - 1,06	18,0 - >20

T = transmissividade
S = coeficiente de armazenamento
I = taxa de infiltração



FORMATO = A 4 210 x 297 mm

PROBIS

MODELO MATEMÁTICO DO AQUÍFERO CÁRSTICO DO JAÍBA

Parâmetros Hidrodinâmicos e Infiltração Adotados no Teste nº 7

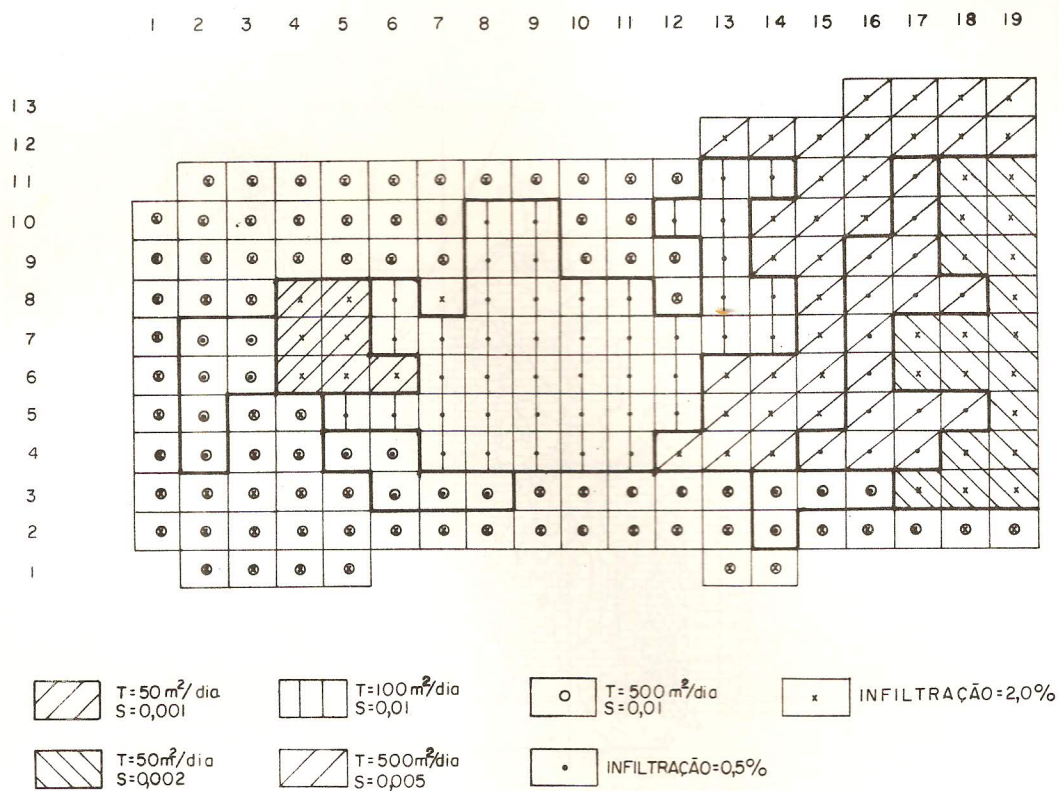


Fig -2

PROJETO KARST
 MODELO MATEMÁTICO DO AQUIFERO CÁRSTICO DO JAÍBA
 MAPA PIEZOMÉTRICO
 T= 30 DIAS - TESTE 7

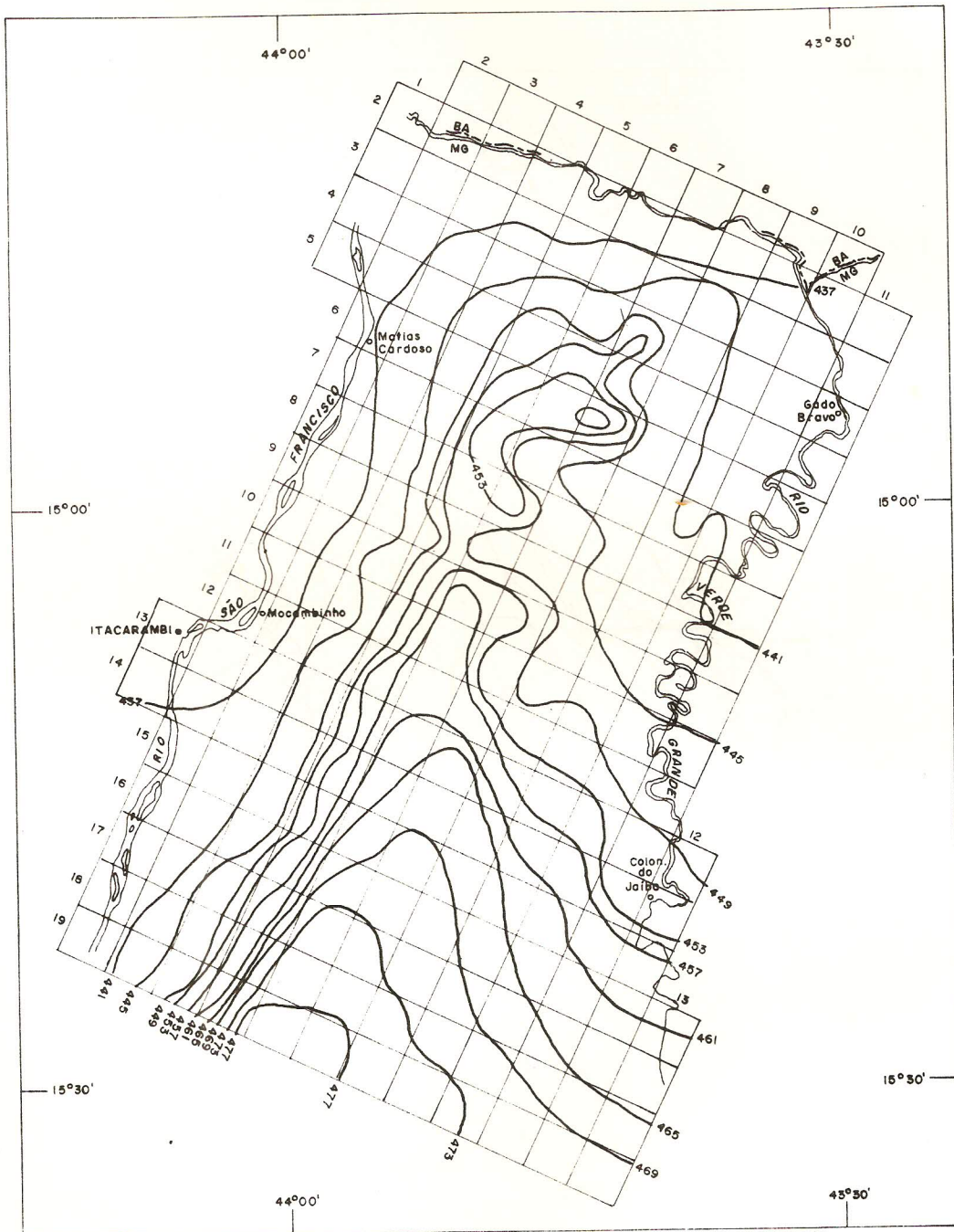


Fig-3

PROJETO KARST
MODELO MATEMÁTICO DO AQUÍFERO CARSTICO DO JAÍBA
MAPA PIEZOMÉTRICO
T= 1440 DIAS - TESTE 7

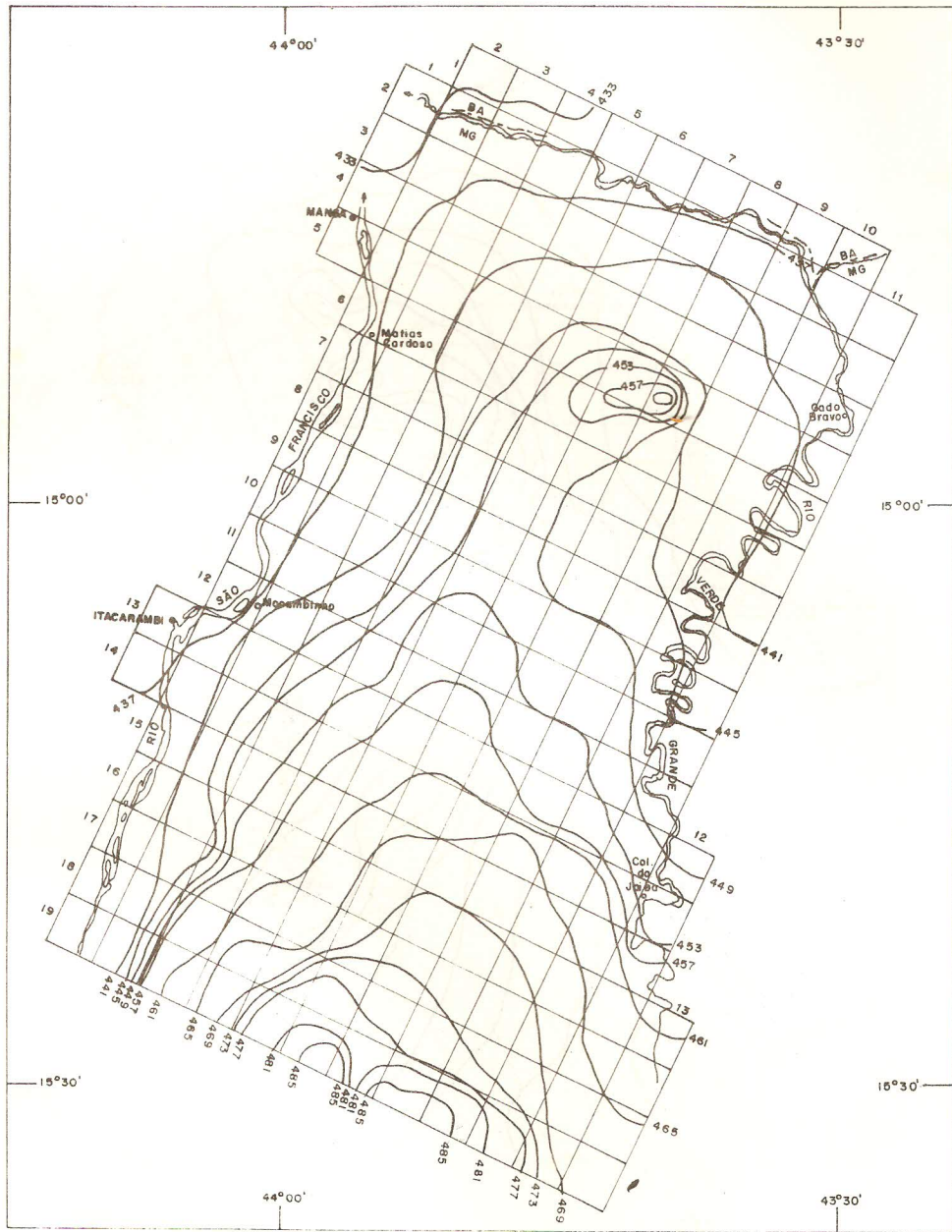


Fig - 4

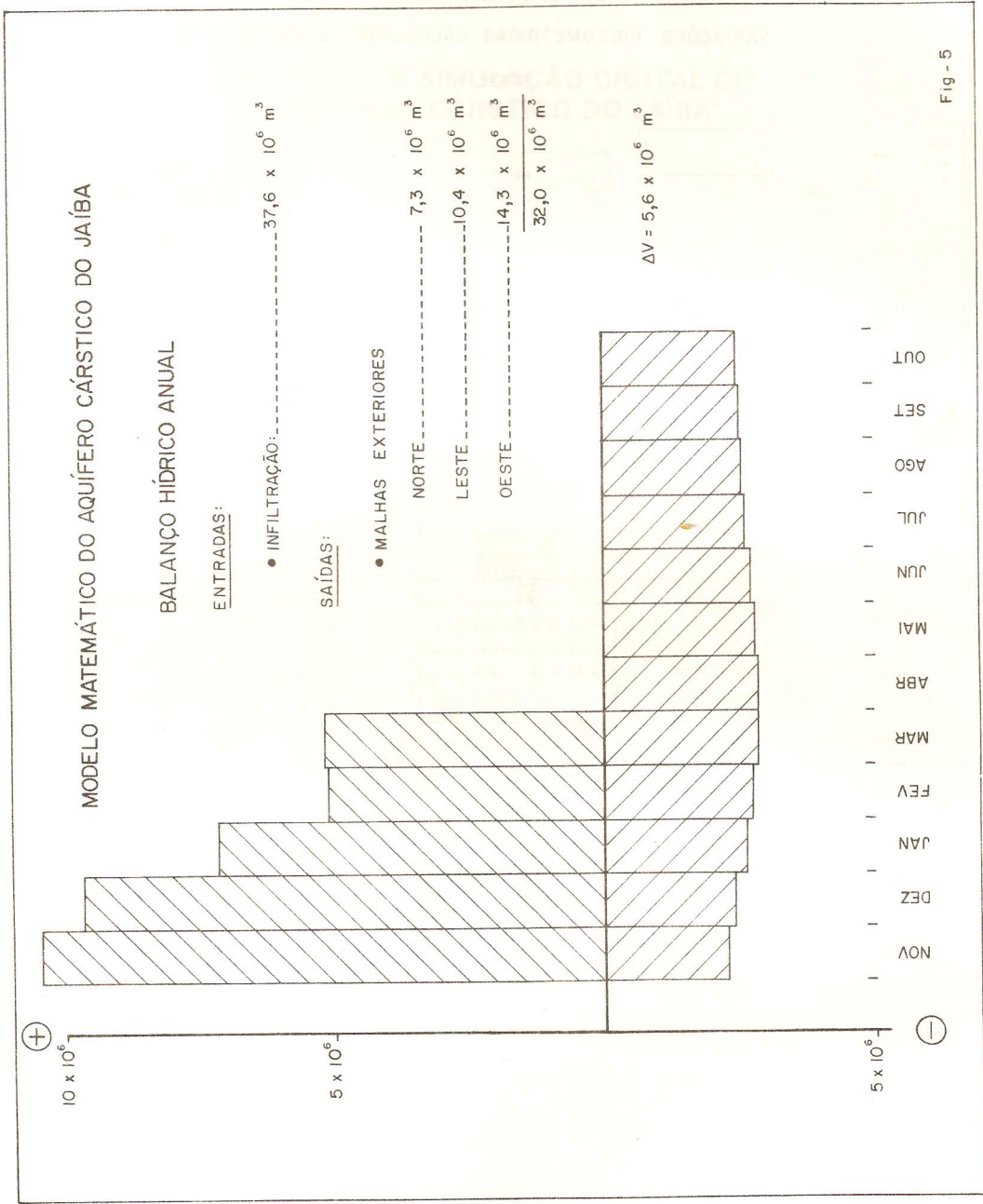


Fig - 5

MODELO MATEMÁTICO DO AQUIFERO CARSTICO DO JAÍBA
 VARIÇÕES PIEZOMÉTRICAS CALCULADAS E OBSERVADAS

TESTE Nº 7

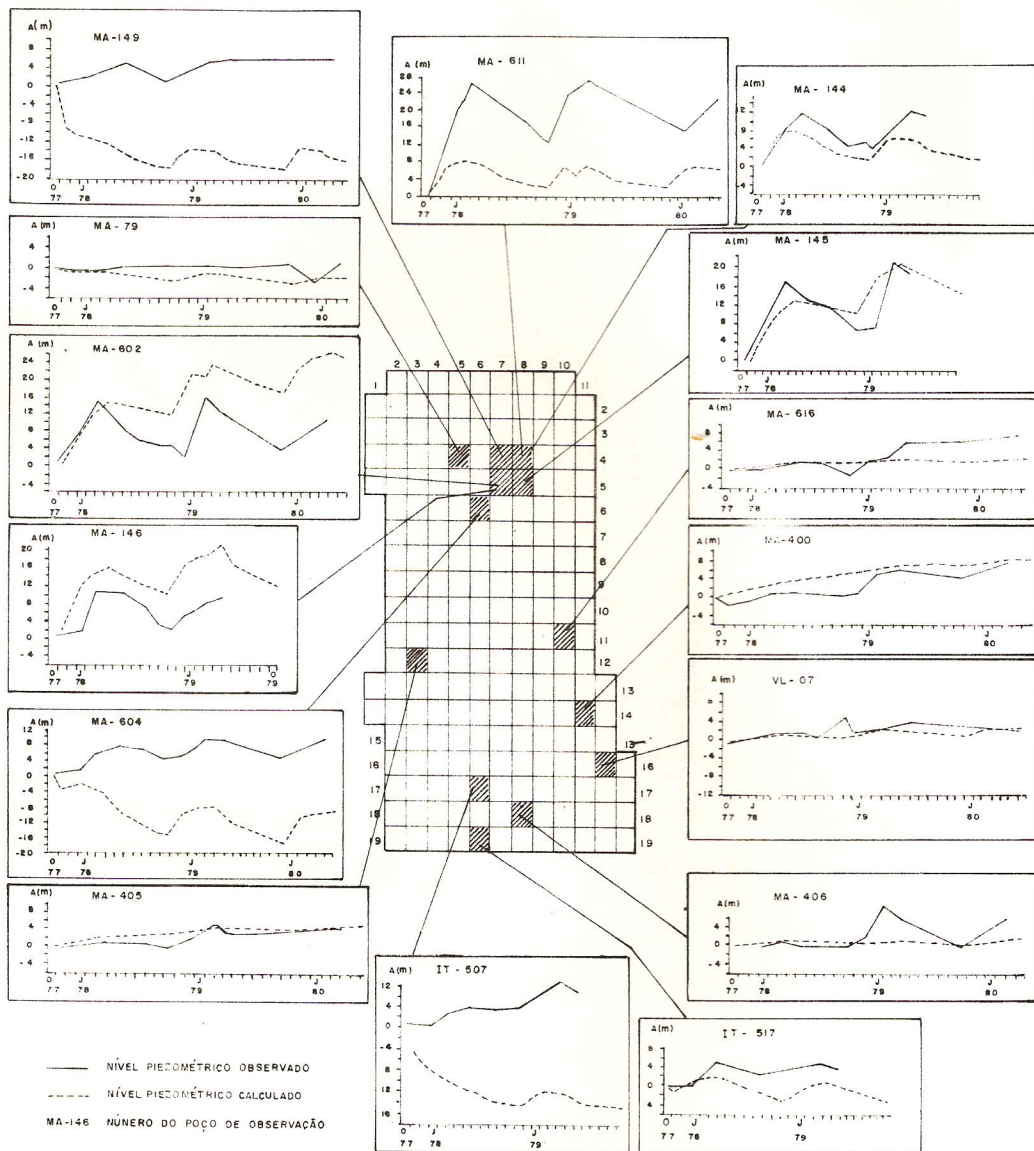


Fig 6