

ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DO CARSTE DA JAÍBA, NORTE DE MINAS GERAIS *

Adelbani Braz da Silva

Geólogo da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC
e Professor de Hidrogeologia da UFMG

Emílio Custodio Gimena

Diretor do Curso Internacional de Hidrologia Subterrânea de Barcelona, Espanha

Paulo Cyro Baptista Escondido

Geólogo da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC
e Professor de Hidrogeologia da UFOP

RÉSUMÉ

La région karstique de Jaibe, du Nord de l'Etat du Minas Gerais, a été étudiée en utilisant plusieurs méthodes de prospections des eaux souterraines afin d'obtenir des informations sur piezométrie, les paramètres de l'aquifère, les caractéristiques géologiques de la région. On a utilisé des isotopes naturels, des traceurs artificiels, des enregistrements géophysiques, aéroportés et de satellite et des études hydrochimiques, hydroclimatiques, géomorphologiques, piezométriques, ainsi qu'un modèle mathématique de simulation. Les surfaces piezométriques de l'aquifère, en périodes humides et sèches, présentent deux niveaux plus élevés, un, au Nord situé au "Morro Catarino" avec des gradients de l'ordre de 0,002 à 0,004 et un autre au sud, dans la "Serra Sabonetal" avec des gradients de 0,003 à 0,005; entre ces deux niveaux, la surface piezométrique présente des gradients de sensiblement 0,004. La transmissivité de l'aquifère est très variable; les transmissivités les plus faibles sont de l'ordre de 5 à 10 m²/jour les plus élevées atteignent 500 m²/jour, les valeurs moyennes sont de l'ordre de 30 à 50 m²/jour. L'interprétation des données hydrogéologiques, géochimiques et des isotopes naturels a permis de mettre en évidence six zones présentant des comportements hydrogéologiques différents. Il a également été possible de déterminer les zones les plus favorables à l'exploitation de l'aquifère ainsi que les conditions de captation les plus appropriées.

1. INTRODUÇÃO

A Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, em convênio com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, desenvolveu, entre dezembro de 1976 a dezembro de 1981, um programa de pesquisa de água subterrânea na região cárstica do Jaíba, ao norte do Estado de Minas Gerais, com objetivo de avaliar diversas técnicas de prospecção. Inicialmente foi realiza

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

do um estudo convencional dos recursos hídricos desse carste tendo em vista o conhecimento mais preciso possível do funcionamento do aquífero e suas relações com as águas superficiais. Nesta etapa foram levantadas todas as informações dos pontos d'água, parâmetros do aquífero, características geológicas da área, etc. Nestes levantamentos foram utilizados isótopos ambientais, traçadores artificiais, sensores geofísicos, sensores aerotransportados, de satélites e estudos hidrogeoquímicos, hidroclimáticos, geomorfológicos e piezométricos. Posteriormente elaborou-se um modelo matemático de simulação do aquífero que serviu para o planejamento dos trabalhos de campo e para orientar futuras pesquisas ou exploração do aquífero. Finalmente foi executado um programa de perfuração visando ratificar hipóteses de trabalho e testar técnicas de desenvolvimento de poços.

Neste trabalho são apresentados os aspectos hidrogeológicos do aquífero, o seu modelo conceitual de funcionamento e as condições de exploração das águas subterrâneas.

2. SITUAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA

A área do projeto situa-se ao norte do Estado de Minas Gerais e abrange parte dos municípios de Januária, Itacarambi, Manga, Monte Azul e Varzelândia, totalizando uma superfície de 5.400 km². Está compreendida entre os paralelos 14°30' e 15°30'S e os meridianos 43°30' e 44°15'W e corresponde à parte das folhas topográficas, na escala 1:100.000, de Januária, Mata da Jaíba, Manga e Japoré.

O rio São Francisco delimita a área a oeste e o seu afluente da margem direita, o rio Verde Grande, forma aproximadamente as bordas norte e leste do projeto.

O rio São Francisco, com uma vazão de base da ordem de 1000 a 2000 m³/s, ocupa um leito de águas baixas cuja largura varia normalmente entre 800 m e mais de 1000 m e cuja profundidade máxima tende até 15 m. O material das margens é geralmente de areia fina a média, silicosa, relativamente limpa. O terraço atual está restrito às imediações do rio. Sua cota decresce desde 447-438 m, de sul para norte, uns 10 metros. Um segundo terraço se estende por ambos os lados do rio nas cotas de 452 e 445 (de sul para norte) com largura variável entre 4 e 10 km.

O rio Verde Grande circula de sul à norte no lado leste da área de estudo e logo vira para a esquerda, formando um ângulo de aproximadamente 90° , para dirigir-se ao rio São Francisco. Sua vazão é pequena ($10 \text{ m}^3/\text{s}$) e suas águas correm dentro de uma aluvião de areias silicosas limpas ou pouco limosas, com uma largura entre 200 e 400 metros, onde existem meandros bem marcados com lagoas abandonadas. No extremo norte recebe pela direita o rio Gurutuba que tem uma vazão aproximadamente igual à metade da sua.

A área é constituída de uma sequência calcárea, pertencente ao Grupo Bambuí do Pré-cambriano, que repousa diretamente sobre o embasamento cristalino Pré-cambriano. Estas rochas calcáreas são recobertas, em grande parte da área, por capeamento detrítico Terciário-Quaternário. Do ponto de vista estrutural, esta área corresponde a um bloco rebaixado por falhamento paralelo ao rio São Francisco, estando nela representadas as unidades da seção superior do Grupo Bambuí. O alicatamento dos calcáreos é sub-horizontal, sendo afetado somente por suaves movimentos de fundo de bacia, traduzidos em grandes fraturas nas direções preferenciais $N 40-50^\circ W$ e $N 30-40^\circ E$. Morfologicamente esta região é constituída por uma superfície aplainada (cota 470-480) em área de depressão, com depósitos de cobertura de textura variada, rede de drenagem com vales pouco profundos e com predominância do desenvolvimento de formas cársticas. Apenas na parte sul desta área é que destaca-se o relevo topográfico acentuado da serra Azul e da serra do Sabonetal (cota 770). Outro destaque, mas pouco saliente (cota 500-510), é o Morro Catarino, ao norte da área, próximo aos povoados de Lajedinho e Lajeão. Nas áreas marginais dessas serras, recobertas por materiais recentes, aparecem dolinas abundantes. Na porção central da área, que tem uma superfície quase plana, as rochas carbonáticas, normalmente, são recobertas por materiais detríticos recentes de caráter arenoso. É uma região cheia de dolinas com fundo que chega a 4-6 metros de profundidade em relação a superfície geral. Essas dolinas existem tanto entre os rios São Francisco e Verde Grande como mais a leste. O nível mais profundo de carstificação pode ter relação com o máximo encaixamento do rio São Francisco na cota 430 em Januária, e 420 em Manga. Perto da Colônia do Jaíba, cuja cota é 470m, pode esperar-se de 50 a 60m, onde existiriam fissuras com desenvolvimento cárstico.

Este carste se caracteriza melhor nos locais onde a cobertura coluvial da superfície pleistocênica foi removida. Ele é típico, portanto, sobre algum terraço de erosão e em áreas rebaixadas de "piedmont". São comuns dolinas de fundo plano e argiloso que aparecem de forma concentrada ou em coalescências, formando uvalas e em alguns casos chegando a formar "poljê". Normalmente essas dolinas de fundo plano, argiloso, evoluíram a partir de áreas de má drenagem. Por conseguinte são comuns nesta área vales rasos intermitentes, como também os vales cegos que se originam nas referidas dolinas.

3. ESTUDOS PIEZOMÉTRICOS

Em vista de que o carste da área, em princípio, é um aquífero livre, as superfícies piezométricas foram construídas, em períodos secos e em períodos úmidos, a partir de nivelamentos altimétricos dos níveis piezométricos medidos em poços da rede básica de observação, lagoas, veredas, fontes, rios e riachos.

As oscilações piezométricas foram observadas durante o projeto (outubro de 1977 a agosto de 1981) através de um controle periódico dos níveis d'água dos 66 poços da rede de observação e de medidas contínuas obtidas em seis linígrafos instalados estrategicamente na área.

3.1. SUPERFÍCIES PIEZOMÉTRICAS

Foram estudadas três superfícies piezométricas (janeiro-fevereiro/1978, época úmida (Figura 1); agosto/1978, época seca; janeiro-fevereiro/1979, época extraordinariamente úmida).

Os mapas piezométricos foram confeccionados a partir de um nivelamento realizado com altímetro de precisão com erro de ± 1 m ou talvez ± 2 m em alguns pontos.

Todas as superfícies piezométricas mostram elevações permanentes. Uma está ao norte, bem localizada sobre o Morro Catarino, com gradiente da ordem de 0,002 a 0,004. A elevação desaparece para formar uma superfície freática de gradiente igual ou menor a 0,0004, que se prolonga até aos rios Verde Grande e São Francisco e para a planície central. A outra situa-se ao sul, sobre a serra

do Sabonetal, com gradientes piezométricos para o leste e oeste que podem valer entre 0,003 e 0,005, e mais suaves para o norte, da ordem de 0,002. O efeito que a serra Azul pode produzir sobre a forma da superfície piezométrica e sobre os gradientes não são conhecidos, se bem que parece ser uma área permeável, salvo a própria Serra Azul. Nesta área o rio São Francisco é claramente o nível de base do aquífero.

É difícil definir a situação na área central e ao longo do rio Verde Grande porque existem poucos pontos piezométricos nesta zona central e na margem direita do rio Verde Grande. Os dados disponíveis não mostram um divisor de água entre o rio São Francisco e o rio Verde Grande mas sim uma superfície piezométrica inclinada que ascende desde o rio São Francisco até o rio Verde Grande com áreas deprimidas na Colônia da Jaíba e perto da embocadura do rio Gurutuba. A grosso modo, essas duas áreas mais deprimidas piezometricamente podem indicar zona de maior transmissividade devido a um maior desenvolvimento cárstico, inclusive parece coincidir com as áreas de maiores densidades de dolinas. A zona deprimida que vai desde a Colônia da Jaíba para o noroeste é permanente, ainda que possa estar ressaltada por um bombeamento concentrado nesta área. Na outra zona deprimida praticamente não existe bombeamento.

Toda essa interpretação está baseada admitindo-se que o erro de nivelamento é de ± 1 m ou no máximo ± 2 m.

O gradiente piezométrico na zona central seria menor que 0,00005 o que requer uma elevada transmissividade global.

Comparando a piezometria com a cota do rio Verde Grande tem-se:

Trecho Cachoeirinha - Colônia da Jaíba: rio afluente (recebe descarga de água subterrânea).

Trecho Colônia da Jaíba - 10 km a jusante: rio possivelmente influente (perde água ou está próximo de perdê-la).

Trecho 10 km a jusante da Colônia da Jaíba - Fazenda Barrinha: rio fracamente efluente (pode receber um pouco de água).

Trecho Fazenda Barrinha - confluência rio Gurutuba: rio influente

(perde água, mais parece que é em pequena quantidade).

Trecho confluência rio Gurutuba - Gado Bravo: rio fracamente efluente (pode receber um pouco de água).

Trecho Gado Bravo - Fazenda Barreiro: rio efluente (recebe água, o que tudo indica, em pequena quantidade).

3.2. ANÁLISE DAS VARIAÇÕES PIEZOMÉTRICAS

Dos diferentes pontos da rede de observação piezométrica dispõe-se de dados mensais (nem sempre completos) desde outubro/1977 até agosto/1981.

Os dados cobrem razoavelmente as zonas norte e sul e muito pouco a zona central por falta de poços e grande dificuldade de acesso. Na Figura 2 representam-se as oscilações entre a época úmida e a seca, suas características de defasamento com a infiltração e também a resposta à época extremamente úmida do princípio de 1979.

Os diferentes hidrogramas dos pontos da rede básica foram estudados qualitativamente tendo-se em conta as seguintes observações contidas no Quadro 1, das quais destacam-se:

- oscilação piezométrica no ano 1978, onde foram compensados os possíveis erros;
- tendência a que o mínimo e o máximo do hidrograma coincida com o atraso ou atrase muito em relação ao final da época seca e a época úmida;
- resposta rápida, suave ou muito suave do hidrograma;
- efeito repetitivo dos períodos úmidos, em especial para o extraordinário ano de 1979, especificando se no período mais úmido a resposta é igual ou maior e se a água infiltrada no período mais úmido se acumula ou não.

Pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Área elevada do Morro Catarino: recarga rápida, não necessariamente grande e saída rápida da água que entrou. Uma chuva normal é suficiente para subir os níveis até a um máximo controlado pela superfície do terreno ou por uma zona superior de maior permeabilidade.

QUADRO 1

CARACTERÍSTICAS DOS HIDROGRAMAS DOS PONTOS DA REDE DE NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS

a b c d				a b c d				a b c d					
MORRO CATARINO				SERRA DO SABONETAL				MARGEM DIREITA RIO SÃO FRANCISCO					
MA-612	13	N R	Nc13	MA-198	2 RR	N Rc3	MA-402	0,5 RR	N -	MA-405	1	N N	RRe5
MA-146	10	N R	N 8	MA-406	1 N	N RRc9	MA-401	1	- -	IT-514	1	N N	-
MA-605	18	N R	Nc16	MA-424	1 N	N Re4	IT-510	0,5 RR	N -	IT-515	1	R N	RRe4
MA-149	5	RR S	Ns5	MA-415	1 RR	N RRs8	IT-500	<0,5 RR	- -	IT-511	1,5	- -	-
MA-144	10	N S	Nc9	MA-084	4 N	S Rs8	IT-512	1	R N	RRs5			
MA-145	10	N R	Nc	MA-195	1 N	N Rc3	IT-516	1	N R	RRe5			
MA-604	3	R S	Nc4	MA-410	2 N	S Re8	JM-075	2	- SS	-			
MA-607	>12 (20)	N R	Ns11	MA-098	2 N	N Re3	Colônia do Jaíba						
MA-611	>14	N R	Nc14	MA-426	1 R	S RRs6	MA-131	2	RR N	RRe5			
MA-612	> 6	R R	Nc11	MA-427	2 R	S Rc4	MA-115	<0,5	N N	R2			
MA-001	2	NR N	Rc5	MA-421	2 RR	R Ne4	MA-114	11	N R	Ns12			
MA-608	>10 (20)	N S	Nc13	MA-428	0,5 RR	S RRs7	MA-004	2	R S	Rc3			
MA-603	10	N S	Nc8	IT-507	4 R	N Rc6	MA-618	1	NR N	Rc4			
MA-601	5	N S	Nc2	IT-517	2 N	S Nc3	MA-005	6	N R	NRc4			
MA-006	11	N S	Nc12	IT-020	5 N	R Nc	MA-151	2	R S	RRe7			
Plano Norte				IT-025	(3) N	- Rc3	MA-400	2	R SS	RRe6			
MA-069	< 0,5	R SS	Ne1	IT-519	1 N	N RRc2	MA-081	1	R S	Ne3			
MA-600	< 0,5	- N	N	IT-504	0,5 N	N Ne4	MA-616	3	R S	Re7			
MA-200	2	N N	RR9	JN-020	0,5 N	N RRc3	MA-125	<0,5	R N	RR3			
MA-211	0,5	RR N	Re2	JN-405	5 N	R -	MA-617	0,5	N N	N			
MA-079	0,5	RR S	Rc1	VL-008	0,5 RR	N RRs2	MA-203	1	N N	RRe6			
MA-212	1,5	R S	Ne3	VL-007	1 RR	N Nc2	MA-123	<0,5	- N	Nc<0,5			
MA-043	1,5	RR N	R3				MA-619	4	R SS	Re8			
Média Rio Verde Grande							MA-128	1	RR SS	Re5			
MA-206	1	N N	Ne1				MA-003	5	N S	NS5			
MA-208	1	RR N	RRe7										
MZ-107	< 0,5	RR S	Ne2										
MZ-200	< 0,5	RR S	Re2										
MA-027	< 0,5	- -	Rs3										

a) Oscilação piezométrica no ano 1978, descontando valores muito baixos antes de março de 1979.

b) Época com máximo e mínimo

N = normal (março-novembro), coincidente com final da época úmida e final da época seca.

R = com atraso (junho-novembro)

RR = com grande atraso (agosto-novembro-dezembro)

c) Características das variações do hidrograma

R = resposta rápida

S = resposta suave

N = resposta muito suave ou quase nula

d) Efeito das fortes chuvas e enchentes de janeiro-fevereiro de 1979

N = resposta similar a outras épocas úmidas

R = difere de outras épocas úmidas

RR = difere muito de outras épocas úmidas

O número é a variação piezométrica extrema em 1979 (janeiro-maio).

c = sobe e cai

e = sobe e não cai

s = sobe e cai parcialmente

- Área plana ao norte: área com possibilidades de acumular água em anos úmidos. Resposta característica de um aquífero com reservas.
- Área plana central: dados insuficientes. Parece ser uma área com pouca acumulação de água em anos úmidos. Resposta característica de um aquífero com reservas.
- Área da Colônia da Jaíba: área muito heterogênea, com uma possível faixa de elevada permeabilidade entre áreas com circulação preferencial através de fraturas de baixa acumulação de água.
- Área da Serra do Sabonetal: na área alta a recarga é rápida, não necessariamente grande, e a descarga é rápida. Essa área estende-se até a Colônia da Jaíba. Os lados noroeste e sudeste são mais favoráveis à acumulação de água e as rochas são mais "porosas".
- A faixa ao longo do rio São Francisco mostra o efeito do rio em um aquífero de difusidade hidráulica (T/S) moderada.

3.3. EXPLOTAÇÕES

Os volumes de água, da exploração anual, estão no Quadro 2. Todos esses valores são menores que a décima parte da recarga mínima estimada, de modo que o bombeamento não afeta sensivelmente a piezometria e o sistema aquífero está perto do regime natural. A única exceção pode ser a área ao redor da Colônia da Jaíba, onde concentram-se as explorações mais importantes. Nestas áreas estimam-se $0,13 \text{ hm}^3/\text{ano}$ em 40 km^2 , ou seja, $3,2 \text{ mm/ano}$ que pode chegar a ser da ordem de grandeza da infiltração da água de chuva. Nesta área, portanto, pode-se esperar modificações piezométricas devido aos bombeamentos e inclusive uma pequena recarga induzida a partir do rio Verde Grande.

O nível de água subterrânea está geralmente a mais de 5m de profundidade; conseqüentemente, não existem perdas de água por evaporação ou evapotranspiração direta. Só existem as seguintes exceções:

- áreas deprimidas perto do rio São Francisco e riachos marginais (São Felipe, Tapera e outros);
- área final do rio Verde Grande, perto da confluência com o São Francisco;

QUADRO 2

EXPLOTAÇÃO ANUAL DO AQUIFERO

ÁREA	SUPERFÍCIE (km ²)	EXPLOTAÇÃO		OBSERVAÇÕES
		(10 ³ m ³ /ano)	(mm/ano)	
Morro Catarino	375	110	0,30	distribuído
Plano Norte	1.250	25	0,02	concentração jun to ao rio Verde Grande
Faixa Central	1.075	130	0,12	muito disperso
Serra do Sabo netal-Centro	750	325	0,42	distribuído
Serra do Sabo netal-Oeste	250	50	0,20	distribuído
Serra do Sabo netal-Este	250	30	0,12	concentração ao longo do rio Ver de Grande
Serra do Sabo netal-Norte (Serra Azul)	375	145	0,40	disperso
Ao redor da Co lônia da Jaíba	750	230	0,30	concentração ao longo do rio Ver de Grande

- excepcionalmente no Morro Catarino, em épocas anormalmente úmidas em que os níveis freáticos quase alcançam a superfície do terreno;
- parte média do riacho Serraria, onde existem algumas fontes de vazão insignificante.

Todas essas perdas de água por evaporação podem-se supor insignificantes.

4. PARÂMETROS GEOHIDROLÓGICOS

Para o conhecimento da transmissividade dos aquíferos ou do coeficiente de armazenamento dispõe-se de dados obtidos de três diferentes métodos:

- a) Ensaios de bombeamento (60), interpretados por métodos convencionais;
- b) Cálculo da vazão específica (50);
- c) Ensaios com traçadores artificiais em poços com fluxo apenas horizontais, medindo-se a velocidade de diluição do traçador.

Só em três casos foi possível dispor de piezômetro de observação. Nos outros casos as observações foram no poço bombeado, extraindo-se a água com ar comprimido o que nem sempre permitiu manter a vazão constante, especialmente quando o rebaixamento era grande. Nestes casos a vazão cai rapidamente e a curva de rebaixamento diminui a sua inclinação.

Em alguns casos foi medido o rebaixamento e depois a recuperação, mas em outros só foi possível medir a recuperação. As vezes os valores da transmissividade (T) obtidos da curva de rebaixamento coincidem razoavelmente com os obtidos na curva de recuperação, mas as vezes podem diferir em um fator de 2 a 4.

A maior parte dos ensaios correspondem à área entre a serra do Sabonetal e a Colônia da Jaíba.

Analisando-se estas curvas observa-se três formas características:

- Curvas "normais", com tendência a que a curva de recuperação passe por um ponto ($s' = 0$; $t/t' = 1$). Os poços que apresentam esta característica correspondem a lugares onde as variações piezomé

- tricas são grandes e repetidas. Possivelmente trata-se de rocha com numerosas pequenas fendas, em material predominante de siltitos. Normalmente nestas áreas os valores de T são pequenos, entre 5 e 50 m²/dia, ainda que às vezes pode chegar a 400 m²/dia.
- Curvas com tendência a uma recuperação rápida e muito rápida. Possivelmente a parte mais permeável são os primeiros 1 a 5m (às vezes menos de 1m), e com o rebaixamento o trecho mais produtivo logo fica suspenso. Os poços com essas características estão perto do rio São Francisco ou na área da serra do Sabonetal e Colônia da Jaíba. Possivelmente trata-se de áreas calcáreas onde existe um desenvolvimento cárstico na zona de nível da água. Pode-se atribuir duas permeabilidades, uma pequena (1,5 a 10 às vezes até 50 m²/dia) para a parte profunda e outra notavelmente maior (20 a 200 m²/dia) no trecho superior.
 - Curvas com tendência inicial a uma recuperação lenta, que mais tarde acelera. O rebaixamento mostra um rápido aumento da inclinação da reta depois de certo tempo. Nestes casos possivelmente o poço intercepta uma zona mais permeável mas de extensão limitada. Estes poços situam-se nas áreas marginais da Serra Azul, Colônia da Jaíba e Morro Catarino e são os que apresentam localmente uma transmissividade maior, entre 100 e 150 m²/dia, mas quando o cone de rebaixamento cresce essa transmissividade diminui notavelmente até 12 a 800 m²/dia. O poço com maior transmissividade é o MA-151, perto da Colônia da Jaíba.

O valor da vazão específica (q) está muito influenciado pelas perdas no poço, em especial se a água provém de poucas e pequenas fissuras. Uma vazão de 1 l/s, de um poço com 150 mm de diâmetro com uma única fissura dá uma velocidade de entrada de 20 cm/s em uma fissura de 1 mm de largura. O regime é turbulento. A vazão específica depende também da duração do bombeamento.

Para poços de 150 mm de diâmetro em aquíferos livres, em bombeamentos de poucas horas de duração, cabe esperar que se verifique a relação $T(\text{m}^2/\text{dia}) \approx 100 q(\text{l/s/m})$.

Na Figura 3 está representada a relação entre "log q" e "log T" para os poços que possuem estes dois dados (em sua maioria na serra do Sabonetal e na área da Colônia da Jaíba). Pode-se observar que poucos pontos se aproximam da linha $T = 100 q$. A reta que

melhor ajusta é a de $T = 40 q$. A dispersão é muito grande podendo variar o coeficiente entre 10 e 500. Não existe uma tendência clara na distribuição, em parte devido a erros em T e que o valor de q está muito influenciado por circunstâncias locais. Os valores com coeficiente maior que 100 possivelmente correspondem a poços com parte mais permeável próxima ao nível freático. Os poços com comportamento "normal" ficam mais próximos ao valor 100.

Como conclusão geral pode-se dizer que nas áreas menos transmissoras o valor é da ordem de 5 a 10 m^2/dia , nas áreas mais transmissoras pode-se chegar a 500 m^2/dia , e que os valores "médios" são de aproximadamente 30 a 50 m^2/dia , sendo que nas partes superiores, nas áreas cársticas, podem alcançar 100 a 300 m^2/dia . Estes dados só valem para a serra do Sabonetal, Colônia da Jaíba e área perto do rio São Francisco.

Tendo-se em conta de que se trata de um cálculo muito grosseiro, pode-se estimar uma ordem de grandeza para a difusividade hidráulica do aquífero a partir dos hidrogramas de níveis, aproveitando a curva de esgotamento no período úmido de 1978. Deve-se considerar o seguinte:

- a) Só são aproveitáveis aqueles pontos com comportamento normal, isto é, com um pico definido e um esgotamento claro.
- b) A presença de recarga retardada ou de heterogeneidades alteram a interpretação.
- c) A possível existência de materiais de permeabilidade muito diferente (zona alta menos permeável e plana mais permeável), a dificuldade para definir os divisores de águas e a distância entre estes divisores a zona de recarga podem introduzir um erro notável que pode chegar a um fator de 2 a 4.
- d) A drenagem tende a ser radial e a análise é feita com fórmulas válidas para sistemas de fluxo paralelo. O erro pode ser grande, em especial perto dos divisores de água.
- e) Deve-se estimar o nível de base de drenagem onde só é conhecido o nível médio. Adota-se um valor único de 440 m, mas na zona central e média o valor 435 m seria também aceitável ou mais apropriado. Aplica-se a fórmula:

$$\frac{T}{S} = \frac{4L}{\pi^2} \times \frac{\ln \Delta_1 / \Delta_2}{\Delta_t} \quad \text{em que:}$$

T/S = difusidade hidráulica (T=transmissividade e S=coeficiente de armazenamento);

L = distância desde o divisor ao limite de drenagem;

Δ_1 = nível de água inicial sobre o nível de base;

Δ_2 = nível de água final sobre o nível de base;

Δ_t = tempo transcorrido entre Δ_1 e Δ_2 .

Do estudo dos hidrogramas e dos linigramas de seis pontos de controle permanente, obtém-se:

ÁREA	$\left(\frac{T}{S}\right) \cdot 10^3 \quad (\text{m}^2/\text{dia})$
Morro Catarino, zona alta	50-400, mais frequente 150
Morro Catarino, zona média	400-700, mais frequente 470
Serra do Sabonetal, zona alta	15-040, mais frequente 25
Serra do Sabonetal, setor oeste	80-300
Colônia da Jaíba, zona afastada	40-100
Colônia da Jaíba, zona próxima	40-400, mais frequente 80

Muito grosseiramente, o efeito do rio São Francisco nos níveis dos poços perto do seu leito, permite obter um valor T/S da ordem de 10.000 m²/dia. Supondo-se uma amortização de 20 a uma distância efetiva de 2 a 4 km, para o ciclo anual.

O número de coincidências entre poços com T ou q conhecidos e com dados de T/S são poucos e por isto é difícil tentar obter valor para S. Por outro lado esse valor S pode estar grandemente influenciado pelo método de cálculo.

Com um caráter meramente indicativo, no Quadro 3 indicam-se os valores prováveis de T e S nas diferentes áreas.

Estes valores são muito imprecisos e devem ser utilizados com grande precaução. A transmissividade pode diminuir notavelmente com o rebaixamento de níveis, especialmente em áreas de calcários. O coeficiente de armazenamento é para rebaixamentos reduzidos.

QUADRO 3

VALORES DE TRANSMISSIVIDADE E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO

Z O N A	TRANSMISSIVIDADE T (m ² /dia)	COEFICIENTE DE ARMAZENA MENTO, S	OBSERVAÇÕES
Alto da Serra do Sa bonetal para Colônia da Jaíba	25; 15 a 40	0,002 a 0,005	
Serra do Sabonetal setor oeste	200; 80 a 300	0,005 a 0,010	
Área da Colônia da Jaíba, zona afastada	70; 40 a 100	0,002 a 0,005	
Área da Colônia da Jaíba, zona próxima	500; 40 a 1000	0,010 a 0,050	
Plano Central, setor leste	100; 50 a 500	0,010 a 0,030	Muito duvidoso
Plano Central, setor oeste	1000; 300 a 2000	0,020 a 0,050	Muito duvidoso
Morro Catarino, zona alta	20; 5 a 50	0,001 a 0,030	
Morro Catarino, pla no Norte	100; 20 a 300	0,010 a 0,030	Muito duvidoso
Margens do rio São Francisco	150; 50 a 300	0,020 a 0,050	Muito duvidoso

5. FUNCIONAMENTO DO AQUÍFERO

Do estudo dos dados hidrogeológicos é possível tirar as linhas básicas que definem o comportamento do aquífero, as quais são ratificadas pelos estudos geohidroquímicos e de isótopos ambientais.

A área pode ser dividida em várias zonas com comportamentos diferentes, conforme mostra a Figura 4. As principais características destas zonas são as seguintes:

- a) Plano Norte: situa-se ao norte da área entre os rios Verde Grande e São Francisco e arredores do Morro Catarino. É uma zona de difusidade hidráulica moderada que armazena água em períodos úmidos. A água é descarregada nos rios Verde Grande e São Francisco, com um gradiente inferior a 0,0004. A saída total deve ser inferior a 500 l/s e a maior parte vai para o rio São Francisco.
- b) Morro Catarino: zona de recarga moderada, muito difusa, com armazenamento muito reduzido e pouca significação hidrológica. A pouca água captada em épocas úmidas é transferida rapidamente para os planos Norte e Central.
- c) Plano Central: é uma zona com poucos dados. Possivelmente esta zona seja a que tem maiores reservas de água subterrânea e globalmente seja mais transmissiva. A saída da água se faz para o rio São Francisco e pode chegar a receber água do rio Verde Grande, ainda que em quantidades pequenas. Parece existir duas faixas de circulação preferencial, uma que origina-se nos arredores da Colônia da Jaíba e outra um pouco a montante da confluência do rio Verde Grande com o rio Gurutuba. Essas faixas de maior permeabilidade parecem continuar na margem direita do rio Verde Grande e possivelmente coincidem com faixas de carstificação preferente.
- d) Serra do Sabonetal: é a parte sul da área passando também pela serra Azul e pela região a noroeste da Colônia da Jaíba. É uma zona de recarga moderada, muito difusa, com armazenamento reduzido e pouca significação hidrológica. A noroeste e sudeste desta zona a situação muda para uma menor difusidade e maior armazenamento de água, com circulação para o rio São Francisco (lado noroeste) e para o rio Verde Grande (trecho a montante da Colô

nia da Jaíba), com uma possível componente para a Colônia da Jaíba.

- e) Ao redor da Colônia da Jaíba: é uma zona notavelmente heterogênea. Parece que entre as estradas para Matias Cardoso e para Gado Bravo desenvolve-se uma faixa de permeabilidade preferencial (carste) que conduz o fluxo de água para o Plano Central e que pode receber água do lado sudeste da serra do Sabonetal e talvez do rio Verde Grande.
- f) Margem do rio São Francisco: é uma zona influenciada pelas variações de nível do rio São Francisco e não afasta-se mais de 2 a 5 km, Nesta faixa existe armazenamento de ribeiras.

6. CONDIÇÕES DE EXPLOTAÇÃO DO AQUÍFERO

O conhecimento atual, baseado nas observações de campo, nos dados do inventário, nas perfurações de poços na área e no processamento dos dados das diversas técnicas de prospecção empregada neste estudo permitem dar uma indicação geral dos locais ou áreas mais favoráveis à exploração do aquífero, como também das condições de captação mais adequadas.

Nas áreas do Morro Catarino e na faixa central da serra do Sabonetal até a Colônia da Jaíba as formações geológicas não oferecem boas condições para ocorrência de água subterrânea podendo apenas fornecer pequenas quantidades de água à pequenos povoados e à fazendas. Essas áreas podem ter problemas de abastecimento em épocas secas prolongadas, ainda que as situações particulares podem mudar notavelmente de um lugar para outro.

As áreas de um lado e outro da serra do Sabonetal - serra Azul, Colônia da Jaíba (lados noroeste e sudeste) e também o plano Norte, oferecem pouco interesse, ainda que o nível de conhecimento é fraco. Essas áreas possivelmente podem suportar explorações para povoados médios e fazendas de tamanho médio, sem grandes problemas em épocas secas.

A área que parece oferecer melhores condições para um exploração mais intensiva é o plano Central, que é a zona mais desconhecida e onde deveriam concentrar-se os esforços futuros de pesquisa. Esta área parece continuar, em forma de faixas carstificadas de elevada permeabilidade (ainda que notavelmente heterogênea) para o

lado direito do rio Verde Grande na área perto do trecho final do rio Gurutuba, e para a Colônia da Jaíba, na faixa situada mais provavelmente entre as estradas para Matias Cardoso e Gado Bravo. Nesta última faixa pode existir problemas de recursos, de forma que a capacidade de extração poderia ser facilmente maior que a água explotável.

Deve-se ressaltar que a grande anisotropia do sistema e a pouca carstificação existente, aliadas à distribuição irregular dos canais de dissolução e as intercalações de camadas argilosas ou margosas, impedem o estabelecimento de critérios rigorosos, ou generalizados, pela locação de poços para toda a região.

Algumas indicações gerais poderão servir de orientação para a locação de poços na área do projeto, tais como:

- as zonas desfavoráveis nos calcários são as pouco fissuradas, ou com fissuras (ou fraturas) preenchidas por calcita, como também onde há intercalações de materiais argilosos;
- o intenso fraturamento em superfície, nem sempre reflete as condições em profundidade e pode apresentar resultados negativos;
- o sistema de carstificação nas zonas de descarga, próximas aos níveis de base, normalmente é pouco profundo;
- o cruzamento de fraturas pode indicar boas condições de circulação e armazenamento. As dolinas orientadas segundo as direções de fraturamento, são bons sítios para locação de poços;
- as "uvalas" (conjugação contínua de várias dolinas) devem ser evitadas, nesta região, para a locação de poços. Normalmente estas "uvalas", que são formas mais maduras que as dolinas, apresentam se colmatadas por material argiloso que impede a infiltração e circulação de água subterrânea;
- poços locados próximos a calcários puros, maciços, sem intercalações de material argiloso, apresentam, na maioria dos casos, resultados positivos. Isso pode ser explicado pelo maior poder de dissolução nos calcários puros;
- em zonas onde os calcários se apresentam intensamente dobrados e intercalados de material argiloso, quase sempre, as vazões são baixas;

- os poços, normalmente, devem ser localados nas bordas de dolinas a fim de evitar problemas com a perfuração;
- nas zonas de recarga do aquífero os níveis d'água, na maioria das vezes, são profundos e as condições locais de armazenamento são pequenas;
- o alinhamento de dolina relacionado com fraturamento, é um bom indício de circulação de água subterrânea;
- com frequência os poços nos fundos de vales ou zonas de topografia baixa tem melhores transmissividades. Isto decorre do fato de que, normalmente, os vales refletem uma erosão diferenciada, pois se encaixam nas zonas mais fraturadas.

Do exposto, concluiu-se que os fatores limitantes à exploração do aquífero calcário, por poços tubulares, dependem diretamente das condições locais (grau de carstificação, litoestratigrafia, geologia e outros).

Os poços tubulares neste aquífero cárstico normalmente podem apresentar as seguintes características:

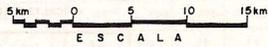
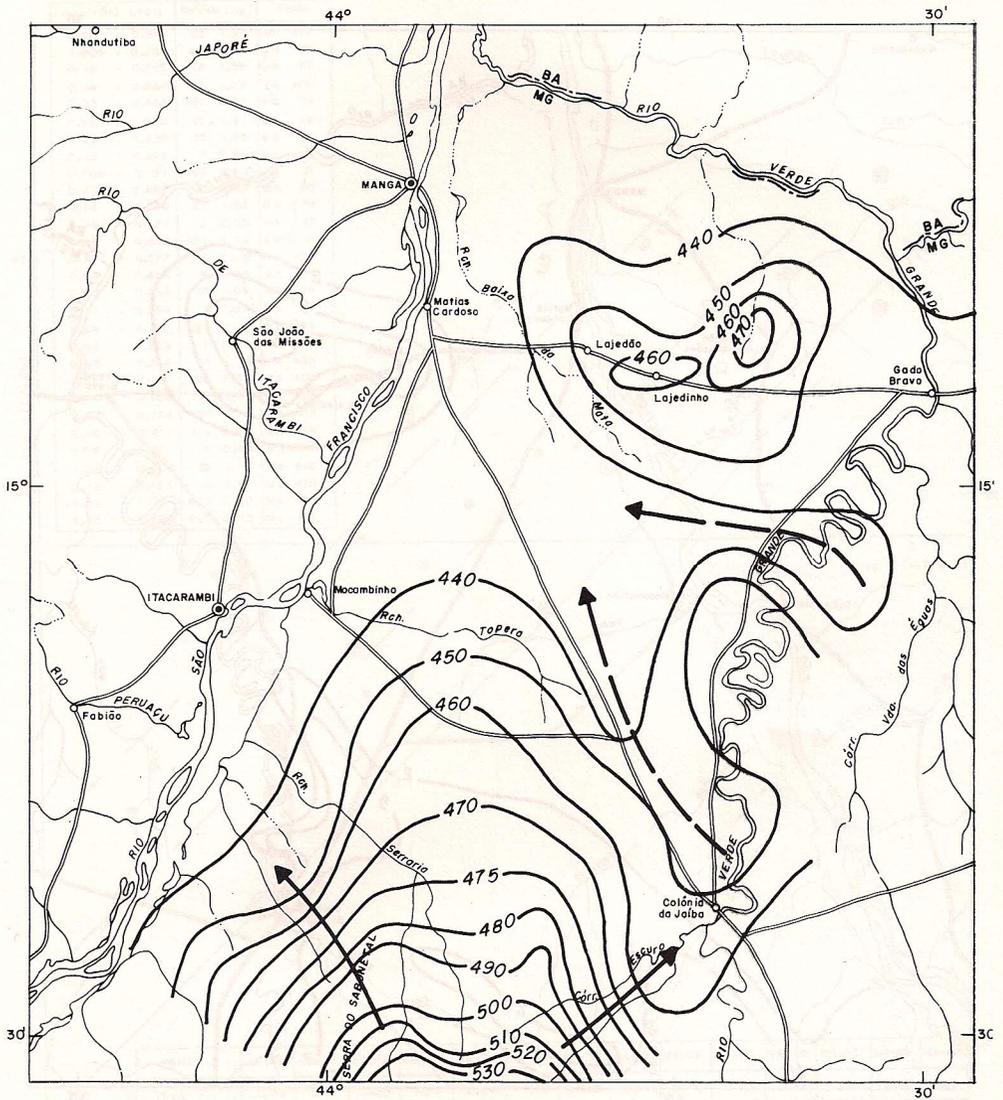
- a partir da profundidade de aproximadamente 100 metros, as probabilidades de os poços alcançarem entradas d'água são mais reduzidas;
- os poços localados nas áreas próximas ao rio São Francisco podem atingir cavernas com grandes quantidades de água;
- há uma tendência a uma redução de vazão específica com a profundidade;
- as vazões específicas podem variar muito. A probabilidade de se obter uma vazão específica superior a 0,86 l/s/m (média das vazões específicas dos poços existentes) é de 22%;
- os níveis estáticos, normalmente rasos, são da ordem de 20 metros;
- há restrições quanto à qualidade química da água principalmente no que se refere a dureza;
- nas áreas onde a oscilação piezométrica (entre as épocas secas e úmidas) é muito grande, a produtividade dos poços é bastante variável, diminuindo sensivelmente quando o nível da superfície piezométrica do aquífero fica muito baixo na época de estiagem.

7. BIBLIOGRAFIA

- COSTA, P.C.G. (1976) - Geologia das folhas de Januária, Mata do Jaíba, Japoré e Manga, Minas Gerais. CETEC-CNPq, Belo Horizonte, 15 pp. (interno).
- CRUZ, W.B. da, SILVA, A.B. (1980) - Modelo de simulação digital do aquífero cárstico do Jaíba. Anais do I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas - ABAS, Recife (PE), pp.359 a 374.
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R. (1976) - Hidrologia subterrânea. Edições Omega. Barcelona, 2350 pp.
- CUSTODIO, E., SILVA, A.B. (1980) - Avaliação e processamento dos dados do projeto Karst. Nota Técnica TRRS-08/80. Projeto Karst. CETEC, Belo Horizonte, 82 pp. (interno).
- CUSTODIO, E., CRUZ, W.B., SILVA, A.B., ESCODINO, P.C.B. (1980) - Estudo hidroquímico do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas - ABAS, 22 pp.
- ESCODINO, P.C.B., SILVA, A.B. (1980) - Aplicação de métodos de prospecção geo-elétricos na pesquisa de aquíferos cársticos. Anais do I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas - ABAS, Recife (PE), pp. 337-349.
- PLATA, A., SILVA, A.B., ESCODINO, P.C.B. (1980) - Perfilagem de poços tubulares utilizando-se isótopos artificiais. Anais do I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas, Recife (PE). pp. 131-146.
- PLATA, A., SILVA, A.B. (1980) - Utilização de isótopos ambientais na pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no "Karst" da região do Jaíba, norte de Minas Gerais. Anais do I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas - ABAS, Recife (PE), pp. 147-168.
- PRICKETT, T.A., LONNQUIST, C.G. (1971) - Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water Survey, Urbana, Bull 55. Traduzido no Boletim 41, Serviço Geológico. DGOH-MOP. Madrid, 127 pp.
- SILVA, A.B. (1979) - Pesquisa e avaliação de recursos hídricos em "Karst" por meio de sensores remotos. Rev. Mineração e Metalurgia, pp. 415. Rio de Janeiro.

SILVA, A.B., ESCODINO, P.C.B. (1980) - Desenvolvimento de um método de perfilagem de poços tubulares utilizando-se traçador químico. Anais do I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas - ABAS, Recife (PE), pp. 119-129.

FIGURA 1 - PIEZOMETRIA EM JANEIRO - FEVEREIRO DE 1978 - PERÍODO ÚMIDO



LEGENDA

- 450 — Curva Piezométrica(m)
- ← Fluxo de Água Subterrânea
- ← - - - Provável Fluxo de Água Subterrânea



FIGURA 2 - OSCILAÇÃO PIEZOMÉTRICA ENTRE A ÉPOCA ÚMIDA E A SECA - 1978

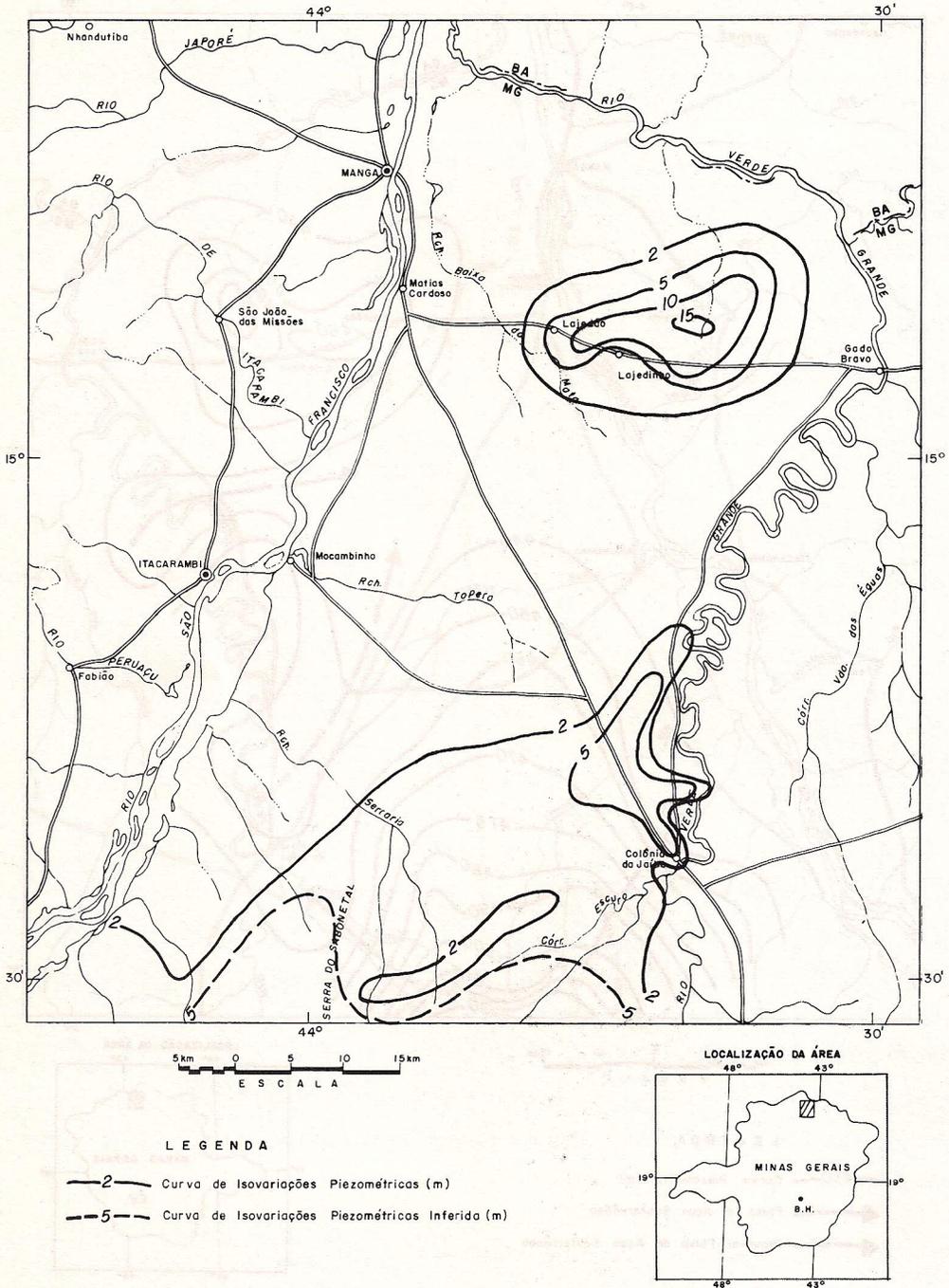
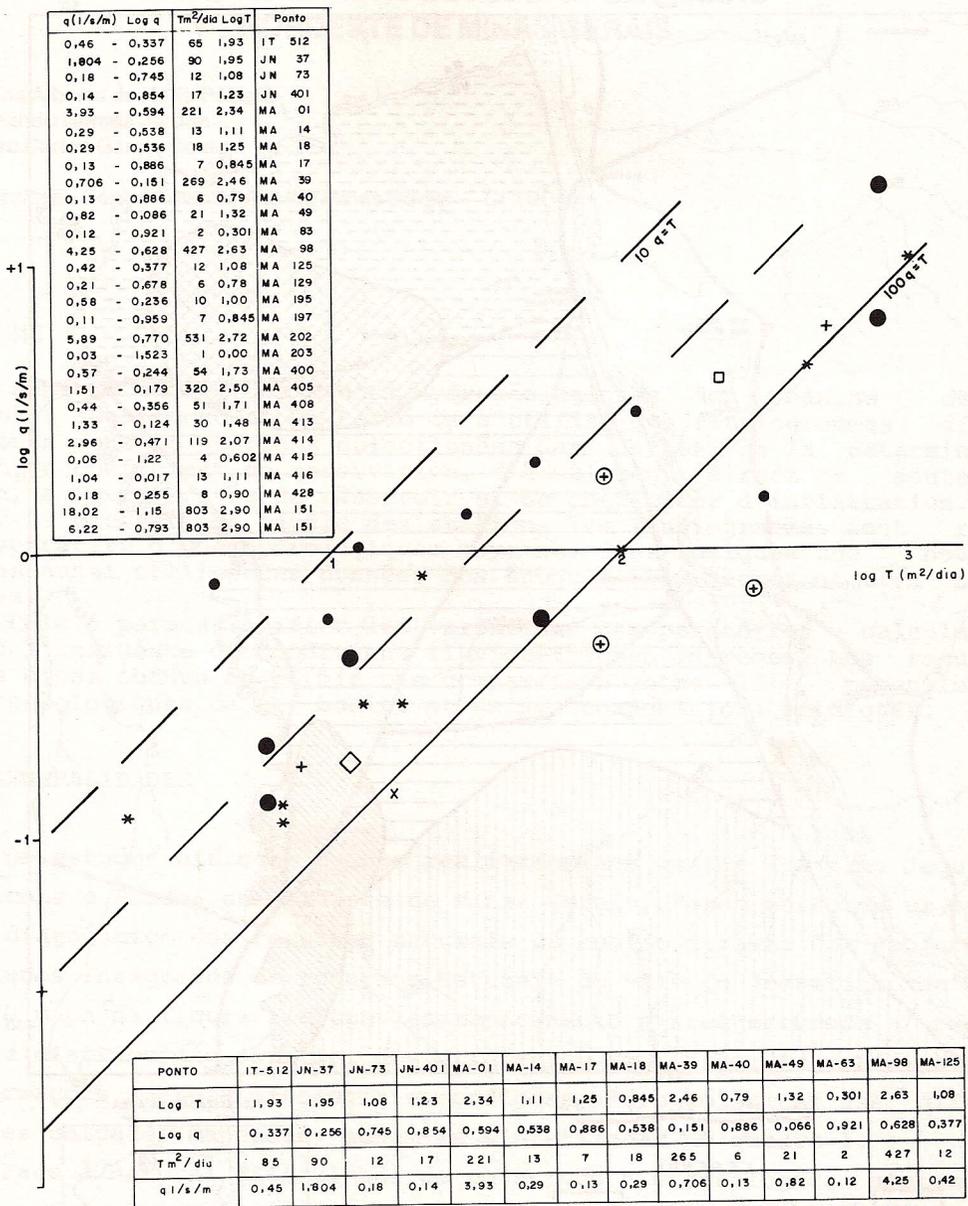


FIGURA 3 - RELAÇÃO ENTRE A VAZÃO ESPECÍFICA E A TRANSMISSIVIDADE



LEGENDA

- Sa. do Sabonetal Centro
- Colônia da Jaíba
- X Sa. do Sabonetal W
- Região Central
- + Sa. do Sabonetal E
- ⊕ Rio São Francisco
- * Sa. do Sabonetal N
- ◇ Lado W. do Rio São Francisco

