

ANÁLISE INTRODUTÓRIA À HIDROGEOLOGIA DO "KARST" PARANAENSE

Carlos Gilberto Fraga¹

RESUMO

Os sedimentos clásticos e carbonáticos do Grupo Açungui, que sofreram os efeitos tectônicos do Evento Brasileiro, formam o "framework" do aquífero "karst" paranaense. A sua maior área de ocorrência é a região norte de Curitiba.

Hidrogeologicamente, a região em estudo é compartimentada em áreas circunscritas por intrusões de diabásio e quartzito, aqui informalmente denominadas de "células estruturais". No modelo conceitual, o magmatismo intrusivo básico juro-cretáceo, constitui o motor propulsor do processo de carstificação. Em termos fisiográficos e geoestruturais o aquífero "karst" é inicialmente dividido em oito subcompartimentos hidrogeológicos.

A potencialidade do "karst" é assegurada por uma precipitação média anual superior a 1.500 mm. Os valores de transmissividade ($\bar{x} T = 68 \text{ m}^2/\text{h}$; 37,5% dos poços possuem valores de T maior que a média) são indicativos de maciços rochosos com processo de carstificação bem desenvolvido.

Hidrogeoquimicamente, as águas alcalinas do "karst" são classificadas essencialmente como sendo do tipo bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas, com valor de dureza médio de 184,6 mg/l de CaCO_3 (67% dos casos apresentam valores inferiores à média).

INTRODUÇÃO

A região do "karst" paranaense, ora em estudo, está localizada no Terceiro Planalto paranaense (figura 1). Esta área abrange uma superfície de aproximadamente 3.482 km^2 , correspondendo percentualmente a 1,64% do território paranaense.

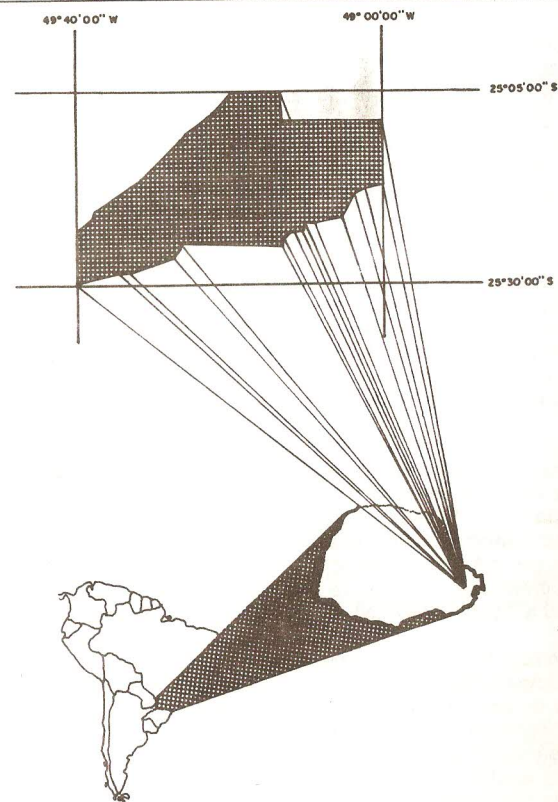


FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

No presente trabalho são abordados os aspectos da geologia regional, dando-se ênfase àquelas feições deformacionais que têm conotação hidrogeológica.

No âmbito da hidrogeologia são enfocados os tópicos relativos à forma e modo de ocorrência das águas subterrâneas no "karst" paranaense. Ensejam os mesmos à formulação de um modelo conceitual do condicionamento hidráulico do "karst". Dentro deste capítulo é feita uma análise dos escoamentos superficiais necessária ao diagnóstico da recarga efetiva do "karst" e seus efeitos na distribuição espacial e temporal da água. Faz parte também deste capítulo, os assuntos referentes à compartimentação hidrogeológica e à potencialidade do aquífero "karst".

Por último, são abordados, em que pese os poucos dados ora disponíveis, os aspectos hidrogeoquímicos de maior interesse do "karst" paranaense. Nesta fase de estudo considerou-se apenas aquelas informações de melhor consistência, ocorrentes nos subcompartimentos hidrogeológicos de: Almirante Tamandaré, Colombo, Tranqueira, Rio Branco do Sul e São Miguel.

(1) FRAGA, C.G. - Geólogo, doutor em hidrogeologia e recursos minerais pela USP - Universidade de São Paulo, técnico da SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná e Professor da PUC - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Fone: 041-322-2125).

GEOLOGIA REGIONAL

Dentro do contexto geotectônico, a área de estudo faz parte do setor central da **Província Mantiqueira**. Supostamente, no Proterozóico Superior, essa área do continente Sul-Americano sofreu um notável espessamento supracrustal. Sedimentos clásticos e carbonáticos se depositaram ao longo de uma faixa de quase 600 km de extensão. São os mesmos reconhecidos desde o divisor d'água dos rios Ribeira e Iguçu, no Paraná, a oeste de Curitiba, até o Estado do Rio de Janeiro.

Segundo HASUI et al (1975), as unidades geológicas do Proterozóico Superior foram dobradas, migmatizadas e injetadas de granitóides. Os efeitos termotectônicos são atribuídos ao **Evento Brasileiro**. Não se pode esquecer também que, as estruturas imbricadas geradas neste evento têm uma relação com a tectônica transcorrente, como abordar-se-á mais adiante, de indiscutível significado hidrogeológico.

O "karst" paranaense é essencialmente formado pelas unidades geológicas da antiga **Série Açungui** (BIGARELLA & SALAMUNI, 1956a), posteriormente reclassificada por MARINI et al (1967) a Grupo Açungui. O quadro de deformações superpostas, associado aos efeitos da tectônica transcorrente, do metamorfismo e magmatismo ácido e intrusões básicas dificultam a reconstrução da seqüência do Grupo Açungui e de suas características cronoestratigráficas.

No Paraná esse grupo, em função do atual estágio de conhecimento, está dividido, da base para o topo, nas formações: **Capiru, Votuverava e Água Clara**. O conjunto sofreu metamorfismo regional de fácies xisto verde baixa e anfibolito alta. Trabalhos mais recentes vêm confirmando os traços estruturais gerais das unidades litoestratigráficas inicialmente reconhecidas. Os limites com as unidades adjacentes (**Complexo Setuva** no Paraná) são marcados por falhamentos transcorrentes. A bibliografia geológica, entretanto, menciona também a ocorrência de contatos de natureza não tectônica, ensejando dificuldades de separação. A questão requer, na verdade, estudos mais detalhados.

Particularmente, a região norte de Curitiba constitui a área de maior ocorrência do "karst" paranaense. A seqüência de rochas carbonatadas é observada em faixas contínuas com extensão lateral variando de 2 a 10 km, e se encontra amplamente associada com filitos e quartzitos, numa seqüência diferenciadamente dobrada (figura 2). Constituem essas faixas, na verdade, estruturas deformacionais do tipo **sinforme**, de espessura real ainda desconhecida. A complexidade do modelo de deformações que o Grupo Açungui sofreu levou os pesquisadores que estudaram a sua área de ocorrência a divergirem muito sobre isso. Notadamente, MAACK (1947) admitiu espessuras da ordem de 5.000 a 7.000 m; MARINI et al (1967) 10.000 m; e PETRI & SUGUIO (1969) 3.500 m.

Na configuração estrutural das unidades mencionadas anteriormente, os **falhamentos** constituem as feições mais importantes, caracterizando-se por apresentarem rochas com intensa foliação cataclástica. Trata-se de uma área fortemente estruturada, onde as seqüências clásticas e carbonáticas apresentam orientações gerais do acamamento e foliação, em parte, diferentes daquelas observadas no embasamento exposto a sudeste da área em estudo.

HIDROGEOLOGIA

Embora seja uma área, em função da dimensão, rarefeita de informações hidrogeológicas, o "karst" paranaense, em função do arcabouço geológico e da pluviosidade (precipitação superior a 1.500 mm), parece se comportar de forma similar às ocorrências já devidamente estudadas nos Estados Americanos e no Continente Europeu.

O desenvolvimento do processo de carstificação é condicionado pelo clima e pelos níveis de base dos grandes traços de drenagens de uma região. Hidraulicamente, asseguram esses, a renovação do fluxo da água e mantêm a sua agressividade.

No Paraná, o processo de carstificação desenvolvido na seqüência de rochas carbonatadas do Grupo Açungui é cenozóico. Esse processo está condicionado aos níveis de base dos rios Iguçu e Ribeira. Entre esses dois níveis de base existem, em função dos deslocamentos horizontais e desníveis topográficos gerados pela tectônica que afetou a região, "n" patamares hidrologicamente diferenciáveis. As falhas tardibrasileiras, juntamente com as intrusões de diabásio e cristas de quartzitos/filitos têm uma indiscutível conotação hidrogeológica. As áreas do "karst" foram compartimentadas em blocos com imbricada estruturação.

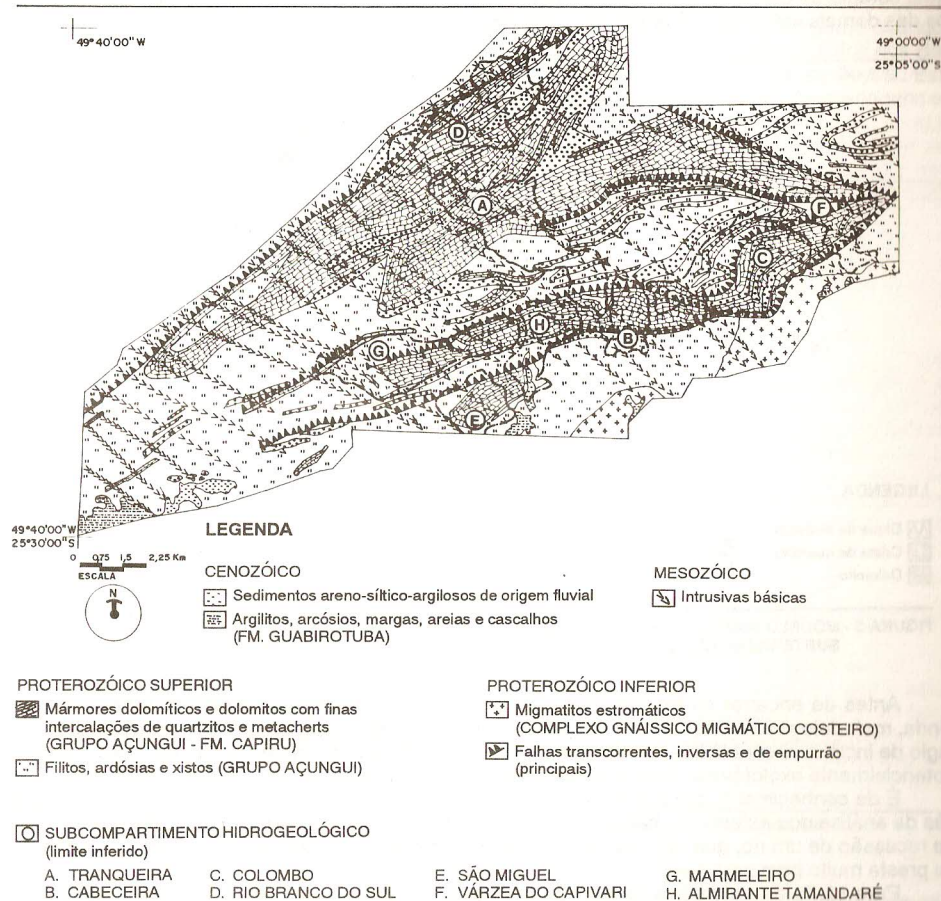


FIGURA 2 - ESBOÇO GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DA ÁREA SUDESTE DE OCORRÊNCIA DO SISTEMA AQUÍFERO "KARST" DO ESTADO DO PARANÁ (Base geológica compilada das folhas da Comissão da Carta Geológica do Paraná, 1970).

Hidrogeologicamente, em face do exposto, a região em estudo é compartimentada em áreas circunscritas por intrusões de diabásio (NW) e quartzitos (NE), aqui informalmente denominadas de "**células estruturais**". O bloco diagrama da figura 3 ilustra o modelo simplificado da ocorrência das águas subterrâneas nos mármore da Formação Capiru, regiões de Almirante Tamandaré, Colombo, Rio Branco do Sul e Itaperussu. Essas células ocorrem em cotas que variam desde 865 m a 1.015 m acima do nível do mar. Constituem, as mesmas, depois dos contrafortes da serra do Mar, os reservatórios de águas subterrâneas mais elevados do Primeiro Planalto paranaense.

Pontualmente, o modelo do condicionamento hidráulico do "karst" pode ser diagnosticado através do mecanismo de ocorrência de diversas surgências naturais, cuja origem está condicionada a contatos litológicos entre os mármore e as rochas clásticas associadas, fortemente influenciadas por falhamentos de extensão regional. Dentro deste modelo conceitual, reforçando o que já foi referido anteriormente, grande parte das estruturas rúpteis, de direção NW, se acham preenchidas pelo magmatismo intrusivo. Neste caso, os **diques de diabásio**, que ocorrem na área em estudo, em média um a cada 1,1 km, ao longo da extensão de uma linha transversal de 26,4 km, além de propiciarem o surgimento de áreas preferenciais de dissolução mais avançada geraram, no

atual estágio de conhecimento, subcompartimentos hidrogeológicos, independentemente dos efeitos das demais estruturas na região em questão (figura 2).

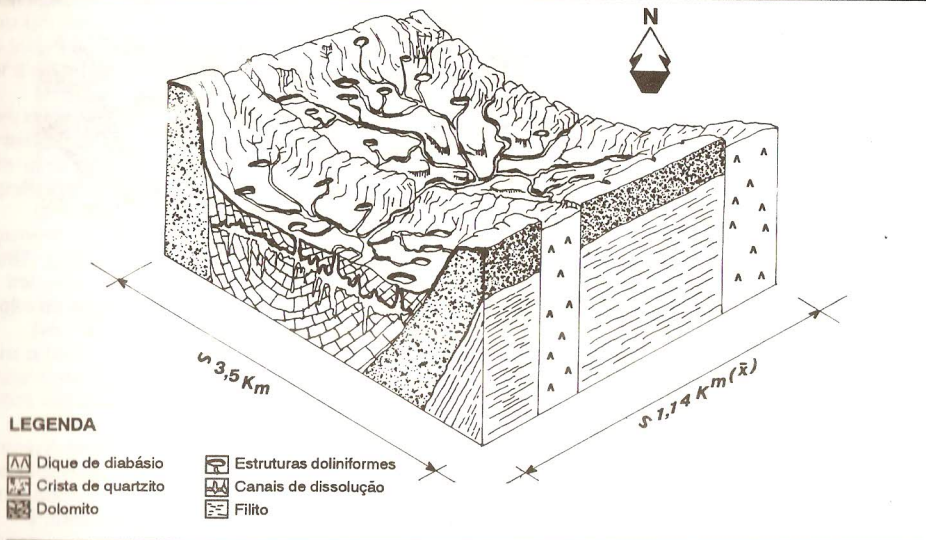


FIGURA 3 - MODELO SIMPLIFICADO DA FORMA E MODO DE OCORRÊNCIA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO "KARST" PARANAENSE (Comunicação escrita FONTANA, 1993).

Antes de encerrar os tópicos gerais do tema da hidrogeologia do "karst" paranaense, cabe ainda, metodologicamente, abordar os aspectos consonantes à **recarga efetiva** do aquífero. No estágio de incipiente conhecimento hidrogeológico do "karst", a visão dimensional das suas reservas, potencialmente exploráveis, é útil e requer a introdução de estudos desse gênero.

É de conhecimento geral que a recarga de qualquer sistema aquífero pode ser definida através da análise dos estudos de balanços hídricos de uma região. As informações extraídas da curva de recessão de um rio, que representa, num lapso de tempo, a restituição das águas subterrâneas, se presta muito bem para isso.

Para efeito da estimativa da recarga efetiva do aquífero "karst", dentre os traços de drenagens da bacia do Alto Iguaçu, as microbacias dos rios Palmital, Barigui e Passaúna, que têm seus pontos de origem na região norte de Curitiba, são os que, geologicamente, mais se adequam à análise em questão. Isso porque as descargas de base destes rios são generalizadamente sustentadas pelas fontes que drenam do aquífero "karst". Por outro lado, os dados extraídos dos postos pluviométricos selecionados são confiáveis e têm consistência desejável (figura 4).

De conformidade, então, com o estudo de vazões regionalizadas, que assegura, simplificada-mente, a obtenção de um **balanço hídrico**, correspondente às fases superficial e subterrânea do ciclo hidrológico, e considerando-se como sendo: (A) a vazão inicial de recessão dos rios igual àquela correspondente a um período de trinta dias sem chuva; em outras palavras, a vazão mínima de trinta dias ($q_{0,30}$) representa a menor média das trinta vazões mínimas consecutivas ocorridas durante o período compreendido entre 1985 e 1992; (B) o valor do coeficiente de depleção (α) = 0,012 - característico da região de domínio do "karst"; (C) para o mesmo período de observação, a vazão de longo período (Q_{LP}) representa a média de todas as vazões ocorridas; (D) a vazão de recessão proveniente exclusivamente da restituição do "karst"; e (E) a pluviometria média anual igual a 1.300 mm, chega-se às conclusões sintetizadas na tabela 1.

A distribuição espacial e temporal quantitativa da água e a análise das seqüências de escoamentos mínimos, decorrentes da linha de raciocínio metodológico, aqui introduzida, permite se obter conclusões interessantes sobre a recarga efetiva do "karst" e seu índice de infiltração. Pelo menos para a área da microbacia do rio Passaúna, onde foi possível confrontar os resultados dos

índices de infiltrações de três postos fluviométricos, localizados à montante do eixo da barragem da SANEPAR, constatou-se que os valores desses índices permanecem constantes, mesmo quando a área de contribuição é multiplicada por um fator de 4,14. E, que, para as microbacias dos rios Barigui e Palmital, o índice de infiltração sofre, em média, um acréscimo percentual de **80,5%**. Esse acréscimo percentual significativo só pode ser atribuído às origens desses traços de drenagens em áreas mais interiorizadas do "karst".

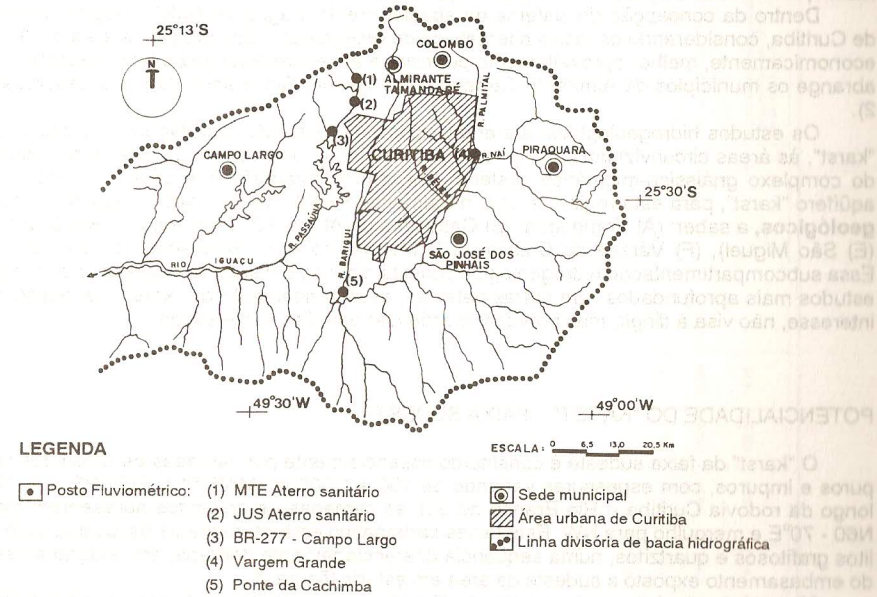


FIGURA 4 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS - TRAÇOS DE DRENAGENS DO ALTO IGUAÇU (Compilado de CEHPAR, 1989).

Considerando a média dos valores apresentados na tabela 1 obtêm-se, em função da pluviometria anual apontada, uma recarga efetiva de **7,14%** para um índice de infiltração médio de **92,8 mm**. Se for computado que, em termos de constituição litológica, há ocorrências de outros tipos de rochas nas áreas de drenagens selecionadas, é bem provável que esse valor esteja sendo subestimado. Estudos dessa natureza, em áreas de similaridade geológica, comprovam isso.

TABELA 1 - ANÁLISE DOS ESCOAMENTOS NECESSÁRIOS AO DIAGNÓSTICO DA RECARGA EFETIVA DO AQUIFERO "KARST" (Cálculos efetuados a partir dos dados pluviométricos do IAP - Instituto Ambiental do Paraná).

Rio	Posto Pluviométrico	Área de Drenagem (km ²)	Vazão de Longo Período (x) QLP (m ³ /s)	Vazão de Recessão (x) q _{0,30} (m ³ /s)	Volume Inicial Armazenado - V _i ¹ (m ³)	Índice de Infiltração (Ia) ² (mm)
Palmital	Vargem Grande	87,0	1,41	0,43	10,9.10 ⁶	125,28
	Barigui	Ponte do Cachimba	257,0	5,59	2,62	33,0.10 ⁶
Passaúna	MTE Aterro Sanitário	20,4	0,33	0,21	1,3.10 ⁶	65,7
	JUS Aterro Sanitário	28,8	0,49	0,30	2,1.10 ⁶	73,3
	BR-277 Campo Largo	84,5	1,17	0,63	6,0.10 ⁶	71,1

(1) V_i = QLP · q_{0,30} / 0,23 026 log α (0,012); (2) Ia = V_i / Área de drenagem.

COMPARTIMENTAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO "KARST"

As seqüências de rochas carbonatadas do Grupo Açungui estão distribuídas, geograficamente, em três faixas bem definidas e alinhadas segundo a direção **NE-SW**. As ocorrências apresentam composição química e características texturais próprias. Elas foram inicialmente estudadas por BIGARELLA (1948) e MARINI & BIGARELLA (1952). Esses autores dividiram as áreas de ocorrências das rochas carbonatadas do Grupo Açungui nas faixas: **sudeste, central e noroeste**. As rochas das faixas sudeste e noroeste pertencem à Formação Capiru, e as rochas da faixa central fazem parte das formações Votuverava e Água Clara.

Dentro da concepção do sistema de abastecimento d'água da RMC - Região Metropolitana de Curitiba, considerando os locais alternativos de reservação e distribuição, a área do "karst" que, economicamente, melhor aproveitamento permitirá é aquela relacionada à faixa sudeste. A mesma abrange os municípios de Almirante Tamandaré, Colombo, Rio Branco do Sul e Itaperussu (figura 2).

Os estudos hidrogeológicos, até então aplicados, têm sido reportados à porção sudeste do "karst", às áreas circunvizinhas do Proterozóico Inferior, onde ocorrem os migmatitos estromáticos do complexo gnáissico-migmático costeiro. Em termos fisiográficos e geoestruturais, o sistema aquífero "karst", para esta região, é aqui inicialmente dividido em oito **subcompartimentos hidrogeológicos**, a saber: (A) Tranqueira, (B) Cabeceira do Atuba, (C) Colombo, (D) Rio Branco do Sul, (E) São Miguel, (F) Várzea do Capivarí, (G) Marmeleiro e (H) Almirante Tamandaré (figura 2). Essa subcompartimentação hidrogeológica constitui apenas um suporte necessário à introdução de estudos mais aprofundados. Em outras palavras, esse zoneamento do "karst", na região de maior interesse, não visa a dirigir, mas provocar e estimular opiniões e interesses.

POTENCIALIDADE DO "KARST" - FAIXA SUDESTE

O "karst" da faixa sudeste é constituído essencialmente por camadas de dolomitos calcíticos, puros e impuros, com espessuras variando de 100 a 1.000 m (MARINI & BIGARELLA, 1952). Ao longo da rodovia Curitiba - Rio Branco do Sul, as camadas de dolomitos apresentam direção de N60 - 70°E e mergulho para NW. Este fácies carbonático está intimamente associado com filitos, filitos grafitosos e quartzitos, numa seqüência diferenciadamente dobrada, em relação às estruturas do embasamento exposto a sudeste da área em estudo (figura 2).

No estágio atual de conhecimento do "karst", as características dimensionais e hidrodinâmicas do mesmo podem ser diagnosticadas, separadamente, para cada subcompartimento hidrogeológico, através das informações de 16 poços tubulares, cujos dados construtivos e hidráulicos se acham ilustrados na tabela 2. Em que pese a heterogeneidade física e anisotrópica do aquífero, e o número pequeno de informações disponíveis, é importante ressaltar que esses dados se acham uniformemente distribuídos na área em estudo. Em termos de grandeza, guardam, os mesmos, uma determinada representatividade.

A perfuração média dos poços é de 60,9 m. Em 10 poços, onde foram registradas as profundidades dos níveis de carstificação, a média é de 49,6 m. Em 40% dos casos observou-se mais de um nível de carstificação, sendo o mais profundo, o intervalo de 90 - 100 m.

Face às altas capacidades específicas constadas ($\bar{x} = 44,62 \text{ m}^3/\text{h.m}$), não foi possível, em nenhum dos 16 poços profundos, em função dos diâmetros úteis das câmaras de bombeamentos e das características técnicas das bombas convencionais de produção, calcular os rebaixamentos máximos disponíveis.

Os valores de transmissividade foram calculados a partir da fórmula empírica: $1,22 \text{ Q/s}$ (rebaixamento considerado foi o da etapa de vazão máxima, projetado para condições de equilíbrio), visto que na maior parte dos casos as recuperações dos níveis d'água dos poços foram registradas em tempos inferiores a uma hora de observação. Mas, pelo menos em duas situações, como se mencionará mais adiante, onde os poços foram submetidos a regimes distintos de bombeamentos, os tempos de recuperações dos níveis d'água permitiram se fazer uma análise qualitativa dos valores de transmissividades, obtidos pela fórmula empírica, com os do método do rebaixamento residual, idealizado por JACOB (1940). Assim comprovou-se que, em função da tecnologia de perfuração e das condições de penetração parcial do aquífero, os valores das transmissividades obtidos pela fórmula empírica são indiscutivelmente subestimados. O erro percentual mínimo é de

TABELA 2 - SUBCOMPARTIMENTOS HIDROGEOLÓGICOS: DADOS HIDRÁULICOS E GEOMÉTRICOS DISPONÍVEIS DO "KARST" PARANAENSE.

SUBCOMPARTIMENTO HIDROGEOLÓGICO: (A), (B), (C), (D), (E), (F), (H)	COORDENADAS DO PONTO		Altitude (m)	CARACTERÍSTICAS DO POÇO		CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS				CARACTERÍSTICAS DO AQUÍFERO	
	Latitude (S)	Longitude (W)		Profundidade (m)	Diâmetro útil (mm)	Piezometria (m)	Q (m³/h)	D's (m/h)	Rebaixamento Máximo Disponível (m)		Transmissividade (m²/h)
(C) Colombo (Cabeceira)	25°16'32"	49°12'56"	990	57,5	250	965,38	150,0	13,16	-	20,1	Mármore dolomítico fraturado nos intervalos de 49-51 m e de 52,5-54 m.
(C) Colombo (Quintino)	25°16'57"	49°12'54"	995	59,0	200	959,85	260,0	26,0	-	39,85	Mármore dolomítico, fraturado, com canais de dissolução semestruais identificados.
(H) Almirante Tamandaré (1)	25°18'33"	49°17'49"	938	142,0	200	932,49	50,0	2,40	-	3,66	Filito com matriz carbonatada, fraturado.
(H) Almirante Tamandaré (2)	25°18'46"	49°17'43"	938	100,0	200	935,0	130,0	26,0	-	39,85	Mármore dolomítico fraturado no intervalo de 90-100 m.
(H) Almirante Tamandaré (3)	25°18'46"	49°17'42"	938	102,0	250	934,3	160,0	15,0	-	22,87	Mármore dolomítico fraturado, com estruturas de carstificação de grande porte (40-41 m, 65 m e 90-91 m).
(H) Almirante Tamandaré (4)	25°18'47"	49°17'44"	938	100,0	250	934,3	160,0	15,0	-	22,07	Mármore dolomítico fraturado, com estruturas de carstificação de grande porte (51-52 m e 88-96 m).
(D) Rio Branco do Sul (Água Santeira)	25°12'12"	49°18'33"	905	21,0	150	905,0	130,56	42,35	-	64,57	Mármore dolomítico impuro, com canais de dissolução de grande porte.
(D) Rio Branco do Sul (Vila São João Batista)	25°14'04"	49°17'50"	1010	36,0	100	1006,44	60,48	15,12	-	23,05	Mármore fraturado, com espessa cobertura de sedimentos. Intervalos Produtivos: 24-23 m.
(D) Itaperussu (Edeirinho)	25°13'06"	49°21'19"	975	33,0	100	974,16	89,95	17,99	-	27,42	Mármore dolomítico impuro, com canais de dissolução de grande porte, parcialmente preenchido por material sílico-argiloso. Intervalo produtor: 27-33 m.
(F) Várzea do Capivarí (3)	25°15'04"	49°09'20"	860	48,0	250	872,60	180,0	95,23	-	145,23	Mármore dolomítico com canais de dissolução de grande porte, sem carga residual.
(F) Colombo - Strapasson	25°16'43"	49°13'42"	998	50,0	250	993,76	320,0	52,72	-	80,38	Mármore dolomítico com canais de dissolução
(A) Almirante Tamandaré (Tranqueira - 1)	25°15'52"	49°18'12"	998	100,0	100	998,0	24,0	72,72	-	110,9	Mármore dolomítico recoberto por um espesso pucelo de quartzito (até 65 m).
(A) Almirante Tamandaré (Tranqueira - 2)	25°15'50"	49°18'12"	999	24,0	200	996,80	360,0	45,85	-	69,92	Mármore dolomítico alterado, cavernoso no intervalo de 14-16 m.
(A) Almirante Tamandaré (Tranqueira - 4)	25°15'51"	49°18'10"	999	15,0	250	995,95	184,0	121,85	-	185,82	Mármore dolomítico com presença de "relieços" - estruturas de dissolução de grande porte.
(E) Almirante Tamandaré (Igreja São Miguel)	25°19'55"	49°19'32"	967	42,0	200	949,90	240,0	39,66	-	60,48	Mármore dolomítico, cavernoso no intervalo de 38-42 m, recoberto por filito até 36 m de profundidade.
(B) Colombo (Cabeceira do Atuba)	25°17'35"	49°15'20"	962	45,0	250	959,60	156,0	112,86	-	172,1	Mármore dolomítico com estruturas cavernosas parcialmente preenchidas com material laterítico (30-36 m, 42-45 m).

25%. Feitas as correções, conforme se pode observar na tabela 2, os valores das transmissividades, para cada subcompartimento estudado, variam muito. O mínimo e máximo, respectivamente observados, foram 3,66 m²/h e 185 m²/h; 37,5% dos poços possuem valores de transmissividade maiores do que a média ($\bar{x} = 68 \text{ m}^2/\text{h}$).

O condicionamento hidráulico exposto acima é indicativo de maciços com processo de carstificação bem desenvolvido. No Paraná a carstificação cenozóica produziu estruturas doliniformes, cuja densidade e desenvolvimento estão preferencialmente circunscritas às áreas circunvizinhas ao magmatismo intrusivo juro-cretáceo. Pelo menos nos subcompartimentos hidrogeológicos de Almirante Tamandaré, Colombo e Várzea do Capivari, os estudos fotogeológicos revelaram que há orientação das dolinas segundo a direção NW.

Da complexidade do padrão de deformação do Grupo Açungui, reconhecido pelos pesquisadores brasileiros, onde os dobramentos recumbentes transpostos, contemporâneos ao metamorfismo regional, foram coaxialmente redobrados e superpostos por crenulações locais, falhamentos transcorrentes e sistemas de juntas e falhas subverticais, o **magmatismo intrusivo juro-cretáceo**, geneticamente atribuído à Reativação Wealdeniana de ALMEIDA (1981) é indiscutivelmente o de maior significado hidrogeológico. Seus efeitos, inclusive, se estenderam ao longo de toda a "zona de falha Curitiba - Maringá" que, segundo SOARES et al (1982) constitui uma área de maior instabilidade crustal, diferenciadamente ativa durante a evolução da história geológica da bacia do Paraná. O magmatismo intrusivo no Primeiro Planalto paranaense se afigura como motor propulsor do processo de carstificação; no Segundo Planalto transformou, por injeções de diabásio sob a forma de apófises e soleiras, os aquíferos da bacia do Paraná, em unidades aquíferas; e no Terceiro Planalto gerou vazões anômalas nos basaltos e processos de transferências de fluxo entre os sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral (FRAGA, 1986 e 1992).

Em dois subcompartimentos hidrogeológicos (Colombo e Várzea do Capivari); três poços com Q/s (m³/h.m) muito altas foram submetidos a regimes distintos de bombeamento. Obteve-se, assim, as equações características das perfurações. Para ambos os casos, os rebaixamentos dos níveis d'água foram projetados para condições de equilíbrio. Na figura 5 são calculadas as perdas de cargas construtivas e as do aquífero para os três poços avaliados. Uma maior aproximação e/ou consistência dos valores dos pontos gráficos de s/Q "versus" Q, das quatro etapas de bombeamento, foi obtida através da análise de regressão.

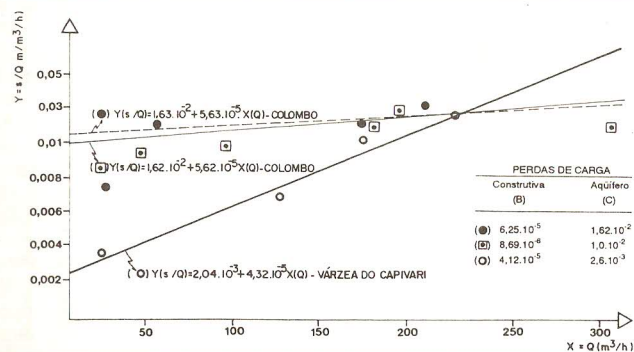


FIGURA 5 - GRÁFICO REBAIXAMENTO ESPECÍFICO (s/Q) "VERSUS" VAZÃO (Q) - SUBCOMPARTIMENTOS HIDROGEOLOGÍCOS DE COLOMBO E VÁRZEA DO CAPIVARI.

Considerando-se que os dados anteriormente referidos (figura 5) correspondem às áreas de maior transmissividade do "karst" paranaense, matematicamente pode-se equacionar, para este condicionamento hidráulico, os rebaixamentos dos poços, através da seguinte expressão:

$$s = 9,5.10^{-3}(B).Q + 1,12.10^{-4}(C).Q^n$$

Admitindo-se que a potência (n) de Q, para esse tipo de meio fraturado sempre é igual ou muito próximo a um (1), o rebaixamento médio do nível d'água dos poços, para uma vazão teórica de 540 m³/h, será igual a 5,19 m. Isso, em princípio, assegura, conforme se abordará no tópico referente aos aspectos macroeconômicos do "karst", a operação de poços com vazões da ordem de 156 m³/h, para aquelas áreas de maior risco geotécnico, onde o aquífero apresenta valores de transmissividade similares.

HIDROGEOQUÍMICA

As análises físico-químicas completas dos elementos maiores (cátions e ânions) de 5 fontes estudadas e 7 poços, constituem os dados selecionados para o estudo hidrogeoquímico preliminar do "karst" paranaense. Essas informações se acham distribuídas nos subcompartimentos hidrogeológicos de: Almirante Tamandaré, Colombo, Tranqueira, Rio Branco do Sul e São Miguel.

Futuramente, na medida em que o aquífero for melhor estudado, um número maior de informações será gerado. A hidrogeoquímica, então, se constituirá numa ferramenta de trabalho muito útil ao estudo do funcionamento hidráulico do aquífero e à origem das mineralizações das águas.

Segundo a concepção gráfica de PIPER (1944) as águas alcalinas do aquífero "karst" são, quimicamente, classificadas como **bicarbonatadas cálcicas** e/ou **magnesianas**. A concentração média de STD é de 189 mg/l. Em 66,6% dos casos, os valores se situam-se abaixo da média. É notável a homogeneidade da composição química das águas (figura 6). Isso é reflexo da composição químico-mineralógica dos **dolomitos** e **dolomitos calcínicos**, que são as rochas que caracterizam a Formação Capiru. Nestas rochas a relação MgO/CaO é praticamente constante (0,5 a 0,7). O estudo estatístico da composição química das rochas carbonatadas desta área, realizado por BIGARELLA (1948), revela que o teor de insolúvel é relativamente baixo, variando de 0,16 a 5%. Em 85% das análises químicas os teores de MgCO₃ variam entre 36-40% e os de CaCO₃ entre 55-59%.

DIAGRAMA DE PIPER

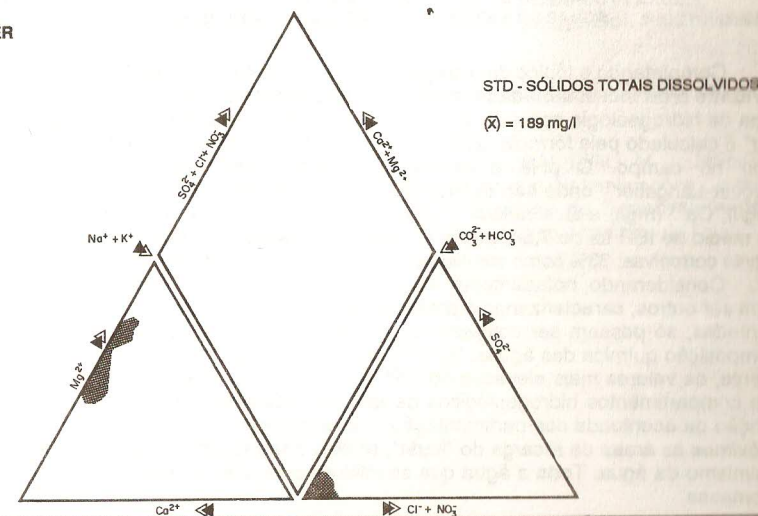


FIGURA 6 - CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUIFERO "KARST" PARANAENSE (FONTES E POÇOS).

A correlação entre os valores da **dureza** e da **condutividade elétrica** das águas comprova, quimicamente, para ambos os compartimentos hidrogeológicos avaliados que, os dolomitos são as principais rochas armazenadoras do "karst". Na figura 7 o valor desta correlação (r) é de 73,43%.

No memorial de cálculo, a condutividade elétrica das águas amostradas, foi obtida a partir da divisão dos valores da concentração dos sólidos totais dissolvidos, em mg/l, pelo fator 0,66. O valor da relação $Na^+ + K^+/Ca^{2+}$, em miliequivalentes químicos ($\bar{x} = 0,058$, com 50% dos dados inferiores à média) reafirma, também, que os elementos químicos dissolvidos na água, provenientes da alteração dos silicatos, são insignificantes.

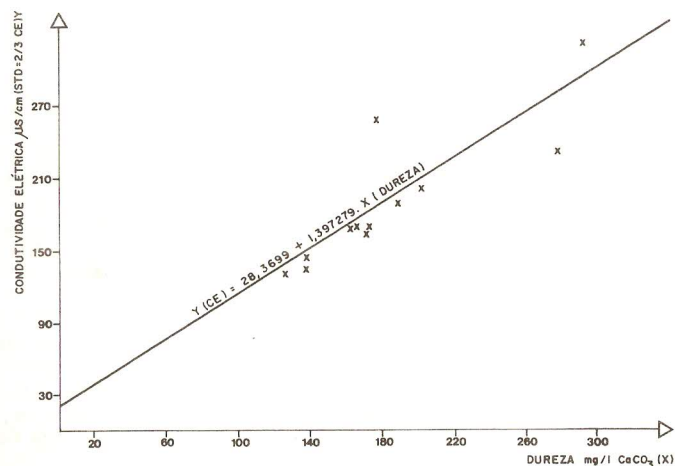


FIGURA 7 - CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E DUREZA DE ÁGUAS DO SISTEMA AQUÍFERO "KARST" PARANAENSE.

Completando o tópico da hidrogeoquímica, o caráter da água do "karst", em termos de **agressividade e/ou incrustabilidade** merece ser aqui comentado porque tem conotação econômica na área da hidrogeologia aplicada. Metodologicamente, o conceito do "índice de estabilidade de Ryznar" é calculado pela fórmula: $IER = 2pHe - pH$, onde (pHe) é o pH de equilíbrio e (pH) é o pH medido no campo. O pHe é graficamente obtido pelo procedimento do "gnomograma de Hoover-Langelier", onde são confrontados os valores da temperatura da água ($^{\circ}C$), resíduo seco (mg/l), Ca^{2+} (mg/l) e alcalinidade - TAC (mg/l de $CaCO_3$). Para as 12 amostras selecionadas, o valor médio do IER foi de 7,54, sendo as águas, percentualmente classificadas em: 50% como francamente corrosivas; 33% como corrosivas e 17% como pouco incrustantes ou levemente corrosivas.

Considerando, notadamente, a natureza química do meio circulante, os valores do IER deveriam ser outros, caracterizando a presença de águas incrustantes. Embora as hipóteses adiante levantadas, só possam ser comparadas mediante o estudo das variações temporal e espacial da composição química das águas, há uma explicação geoquímica para o fato em questão. Provavelmente, os valores mais elevados do IER, sejam reflexos de contínua e rápida renovação de fluxo em compartimentos hidrogeológicos de alta condutividade hidráulica. É admissível, também, em função da acentuada compartimentação hidrogeológica do aquífero, de pontos de captação muito próximos às áreas de recarga do "karst", onde o clima (úmido) exerce uma influência marcante no quimismo da água. Toda a água que se infiltra no subsolo é inteiramente controlada pelo CO_2 da biomassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. de - 1981 - Síntese sobre a tectônica da bacia do Paraná. 3º Simpósio Regional de Geologia. Curitiba, At. (1): 1.20.

BIGARELLA, J.J. - 1948 - Estudos preliminares na Série Açungui. II. Rochas Calcáreas. **Arq. Biol. Tecnol.**, (3): 201-354 - Curitiba - PR.

BIGARELLA, J.J. & SALAMUNI, R. - 1956a - Estudos preliminares na Série Açungui. VII. Algumas estruturas singenéticas nos dolomitos da Formação Capiru. **Arq. Biol. Tecnol.**, (11): 197-205 - Curitiba - PR.

COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ - 1965 - Folha Geológica de Curitiba, CCGP, escala 1:50.000

COMISSÃO DA CARTA GEOLÓGICA DO PARANÁ - 1970 - Folha geológica de Rio Branco do Sul. Curitiba, CCGP, escala 1:70.000.

FRAGA, C.G. - 1986 - Introdução ao zoneamento do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. **Dissertação de Mestrado**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 125 p. (circulação restrita).

FRAGA, C.G. - 1992 - Origem de fluoreto em águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Botucatu e Serra Geral da Bacia do Paraná. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 178 p. (circulação restrita).

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R. & COIMBRA, A.M. - 1975 - "The Ribeira Folded Belt". **Rev. Bras. Geol.**, 5(4): 257-266. São Paulo.

JACOB, C.E. - 1940 - "On the flow of water in an elastic artesian aquifer", **Trans. Am. Geophys. Union**, (21): 564-86.

MAACK, R. - 1947 - Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Arq. Biol. Tec.**, (11): 63-154. Curitiba.

MARINI, O.J. & BIGARELLA, J.J. - 1967 - Rochas calcáreas do Grupo Açungui. **Bol. Paranaense Geol.** (23/25): 105-150. Curitiba.

PETRI, S. & SUGUIO, K. - 1969 - Sobre os metassedimentos da extensão sul do Estado de São Paulo. **Conv. USP/DAEE**, Publ. Esp. São Paulo.

SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M.; MATTOS de, J.T.; BALIEIRO, M.G.; MENESES, P.R. - 1982 - Lineamentos em imagens de LANDSAT e radar e suas implicações no conhecimento tectônico da bacia do Paraná. In: **II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Instituto de Pesquisas Espaciais, Brasília.