

IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA DE FONTES CÁRSTICAS COM O USO DO TRAÇADOR RODAMINA FWT (ÁREA CARBONÁTICA LAJEADO – BOMBAS, IPORANGA-SP)

Claudio GENTHNER
José Antonio FERRARI
Ivo KARMANN

RESUMO

Testes qualitativos com o traçador Rodamina FWT foram realizados para identificar a estrutura da drenagem subterrânea e delimitar áreas de recarga de fontes cársticas de um planalto calcário localizado na região sudeste do Estado de São Paulo. É proposto um método para a interpretação dos resultados dos testes qualitativos, com base na intensidade da fluorescência de fundo detectada nos captadores de carvão ativado. Os resultados dos testes de conexão entre sumidouros e ressurgências mostraram que pelo menos três sistemas de drenagem subterrânea são responsáveis pela drenagem do planalto: Areias (estrutura convergente), Córrego Fundo (estrutura divergente) e Bombas (estrutura ainda não determinada). Os resultados alcançados mostram que a detecção de conexões hidrológicas com o uso da Rodamina FWT e fluocaptadores de carvão ativado é viável no contexto fisiográfico das paisagens cársticas do vale do rio Ribeira de Iguape.

Palavras-chave: rodamina, traçador, aquífero cárstico, carste, cavernas

ABSTRACT

Qualitative tracing tests with rhodamine FWT dye were employed to identify the structure of underground drainage and to define recharge areas of karst springs in a limestone plateau located in the rain forests of southeastern Brazil. A method is proposed for the interpretation of qualitative tests based on natural background fluorescence obtained with charcoal detectors. The results of connection tests between sinkholes and springs showed that at least three karst conduit networks are responsible for plateau drainage: one of convergent structure (Areias), one of divergent structure (Córrego Fundo) and one whose structure has not yet been determined (Bombas). The results show that the detection of hydrologic connections with rhodamine FWT and activated charcoal is viable in the karst landscapes located in rain forests of southeast Brazil.

Keywords: qualitative tracing tests, rhodamine, karst aquifer, caves

1 INTRODUÇÃO

O aquífero cárstico pode ser esquematizado como uma rede de canais altamente permeável, quilométrica, geralmente desconhecida, “imersa” em um volume de calcário fraturado de baixa permeabilidade e conectada com uma área de descarga local, a ressurgência cárstica (KIRALY 1998). Esta dualidade entre um processo de infiltração rá-

pido, caracterizado pela rede de condutos, e uma de infiltração lenta, caracterizada pela rede de fraturas, é responsável pelo caráter anisotrópico e heterogêneo dos aquíferos cársticos.

Conhecer o arranjo espacial da rede de condutos subterrâneos é fundamental para prever o impacto da disposição inadequada de poluentes em áreas de recarga de aquíferos cársticos. Num padrão de drenagem divergente, por exemplo, a infiltração

de um poluente em um único sumidouro pode contaminar várias ressurgências, enquanto que num padrão convergente, diferentes sumidouros podem contaminar uma mesma fonte. Este tipo de informação é relevante para os aquíferos cársticos, conhecidos por serem mais eficientes em transmitir do que absorver poluentes, uma vez que possuem baixa capacidade de autodepuração, quando comparados com outros sistemas de águas subterrâneas (FORD & WILLIAMS 1989).

A identificação da estrutura da rede de condutos envolvida pela matriz fraturada pode ser realizada pela injeção de traçadores em sumidouros e monitoramento das ressurgências. Os estudos qualitativos com traçadores são adequados para identificar conexões entre áreas de recarga e descarga e estabelecer o tipo de rede de condutos subterrâneos (FIELD 1999).

A rede de condutos também pode ser estudada pela topografia de cavernas, no entanto, estas representam menos que 1% do total da porosidade do aquífero como um todo (WORTHINGTON 1991). Apesar desta limitação, o mapeamento direto fornece informações sobre o padrão morfológico, condicionantes geológicos e evolução do sistema de condutos, que complementam os resultados obtidos com a injeção dos traçadores.

Este trabalho apresenta os métodos utilizados e os resultados obtidos com o uso do traçador Rodamina FWT, na identificação da rede de canais subterrâneos e na delimitação das áreas de recarga de fontes cársticas.

2 A ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no vale do rio Ribeira de Iguape, região sul-sudeste do Estado de São Paulo, no município de Iporanga. A partir da cidade de São Paulo, o acesso à área se dá pela rodovia Régis Bittencourt (BR-116) até a cidade de Jacupiranga, em seguida, pela SP 193 até a cidade de Eldorado e, finalmente, pela SP 165 até o município de Iporanga. A área carbonática Lajeado-Bombas margeia a SP 165 num trecho entre a sede do município e o Bairro da Serra, ponto de partida para as incursões na área de estudo (Figura 1). Este trabalho ficou limitado à porção sudoeste da área carbonática, localizada na margem direita do rio Betari, afluente do rio Ribeira de Iguape.

No quadro geomorfológico regional, a área situa-se na transição entre o Planalto Atlântico e os relevos da região litorânea, na unidade fisiográfica da Serra da Paranapiacaba. Segundo a

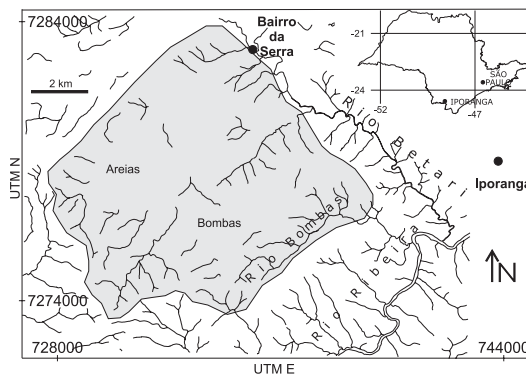


FIGURA 1 - Localização da área de estudo.

compartimentação geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT 1981), a área encontra-se na Serrania do Ribeira, subzona da Serrania Costeira. Trata-se de uma região de clima subtropical úmido, sem estação seca definida (GUTJAHR 1993). O valor médio do total pluviométrico anual para o período 1973-1999 é de 1646 mm, sendo que a estação chuvosa (outubro a março) concentrou em média 1100 mm e a estação mais seca (abril a setembro), 535 mm. As médias térmicas anuais da região encontram-se entre 20° e 22° C. As amplitudes térmicas anuais são relativamente baixas, em grande parte devido à presença da vizinhança oceânica (TAVARES & GUTJHAR 1999). Este clima permite o desenvolvimento da Floresta Perenifolia Hidrófila Costeira (ALONSO 1977), que apresenta uma fisionomia alta e densa, consequência da variedade de espécies pertencentes a várias formas biológicas e estratos. Seus elementos mais altos podem alcançar 25 a 30 m. O grande número de lianas, epífitas, fetos arborescentes e palmeiras dão a esta floresta um caráter tipicamente tropical.

O contexto geológico regional é o da Faixa Dobrada Apiaí, composta pela sequência metassedimentar supracrustal vulcano-sedimentar, genericamente denominada de Grupo Açungui (Mesoproterozóico a Neoproterozóico), o qual é compartimentado em blocos tectônicos seguindo um sistema de zonas de cisalhamento transcorrentes com direções NE-SW (CAMPANHA 1991). A área estudada encontra-se no bloco tectônico Lajeado e uma pequena porção ao sul ocupa uma faixa de transição para o Bloco Ribeira. O Bloco Lajeado é ocupado pela sequência metassedimentar de baixo grau metamórfico do Subgrupo Lajeado, composta por unidades pelíticas, psamíticas e carbonáticas, incluindo um corpo de gabro no topo. A área cárstica desenvolve-se sobre os metacalcarenitos e metacalcilutitos impuros calcíticos e dolomíticos da

Formação Bairro da Serra, e é margeada por serras formadas pelos metassiltitos e filitos da Formação Betari e pelos metassiltitos e metaargilitos da Formação Iporanga (Subgrupo Ribeira).

O corpo carbonático do Lajeado é caracterizado por direções predominantes do acamamento e eixos de dobras segundo o alinhamento regional NE-SW da Faixa Ribeira, que é cortado pelo sistema de fraturas associado ao dique básico mesozóico de direção NW-SE; este último condiciona o entalhamento do rio Betari, nível de base local do sistema cárstico investigado (Figura 2).

A área cárstica constitui um planalto deprimido entre as serras sustentadas por metapelitos. Os

rios que nascem nestas serras são os responsáveis pela recarga alóctone do carste; após percorrerem pequenos trechos sobre o calcário, injetam suas águas em sumidouros, podendo ou não dar acesso a cavernas. A recarga autóctone ocorre através de um conjunto de pontos de absorção localizados no interior de depressões fechadas de tamanho e profundidade variáveis, que se distribuem pela superfície carbonática (Figura 3), caracterizando um carste poligonal (KARMANN 1994). As frentes do planalto são expostas nos pontos onde ele é entalhado pelos rios Betari (Bairro da Serra) e Bombas. Este seccionamento do corpo carbonático permitiu a formação de zonas de descarga para as águas

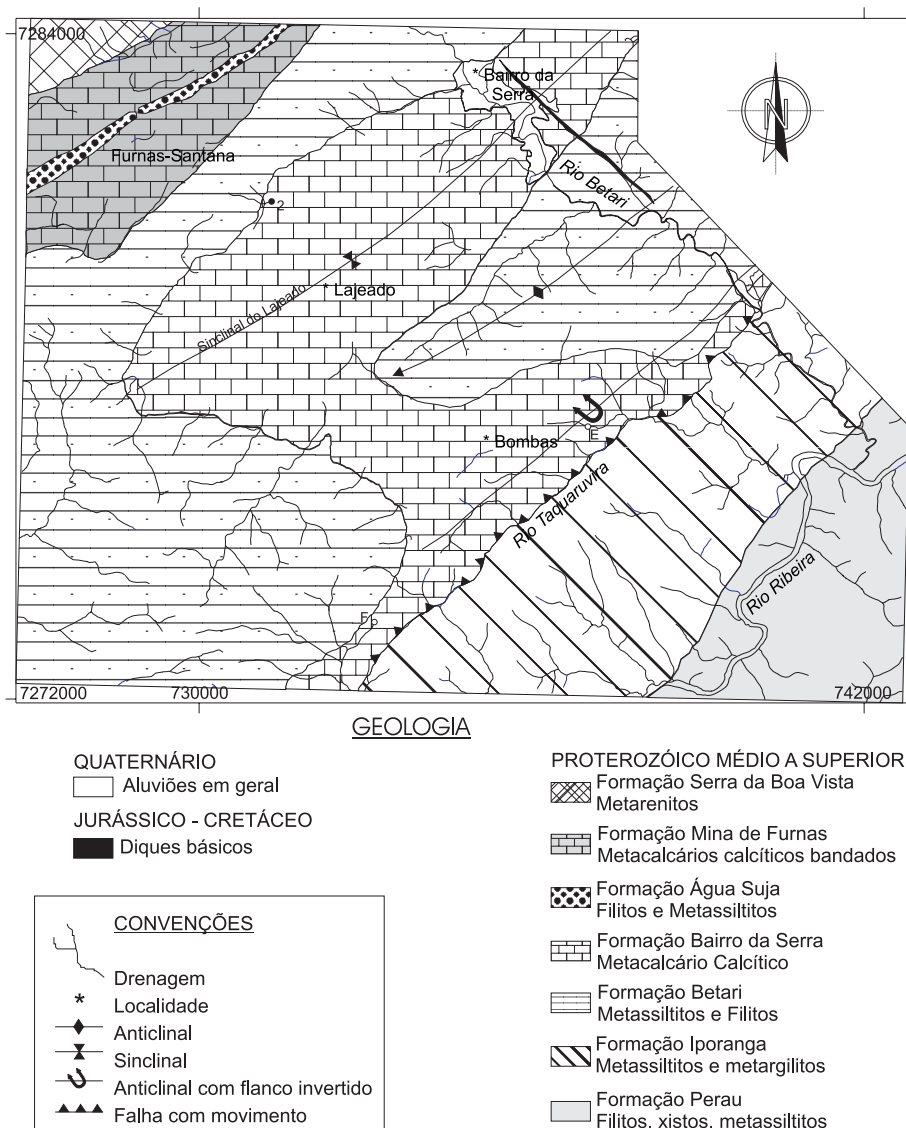


FIGURA 2 - Mapa geológico da área de estudo.

infiltradas no planalto. Nestas áreas são encontrados pontos de ressurgência concentrada, associados ou não a entradas de cavernas, e zonas de ressurgência difusa associadas aos charcos da planície aluvionar do rio Betari. Além das duas zonas de descarga citadas, a bacia do rio Cutia, afluente do rio Ribeira, também drena uma pequena porção do corpo carbonático no setor sul da área. O modelo digital do terreno (Figura 4) permite uma visão global do planalto cárstico e das zonas de recarga e descarga do aquífero associado.

Parte da área estudada encontra-se dentro dos limites do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). Este parque é o grande responsável pela atração dos visitantes para a região, e tornou viável a implantação de pousadas e *campings* em vários pontos do município, especialmente no Bairro da Serra. Segundo DOMINGOS (2002), 10 pousadas e 5 *campings* operam no vale do Rio Betari e 46% da população economicamente ativa trabalha, direta ou indiretamente, em atividades turísticas. A crescente implantação deste tipo de empreendimento certamente aumentará a demanda por recursos hídricos provenientes das fontes cársticas. Atualmente, 80,5% das casas são abastecidas pelo serviço estadual de saneamento básico, 11% por águas provenientes de cavernas e 8,5% por nascentes (DOMINGOS *op. cit.*).

Outro aspecto a ser considerado é que algu-

mas áreas de recarga do carste estão fora dos limites do PETAR, fato que pode comprometer a salubridade da drenagem subterrânea e dos sistemas de cavernas do parque. Práticas agropecuárias e habitações são observadas nas zonas de recarga, no interior do parque e em áreas limítrofes. Neste contexto, o mapeamento das conexões hidrológicas é fundamental para a delimitação de áreas com potencial para a contaminação das fontes cársticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a identificação das áreas de recarga das fontes cársticas foram realizados testes qualitativos com o uso do traçador fluorescente Rodamina FWT, uma versão da Rodamina WT, certificada pela National Sanitation Foundation (NSF-USA) para uso em água potável.

O objetivo dos testes qualitativos foi identificar conexões entre pontos de entrada e de saída de água do sistema. Baseou-se na injeção de uma quantidade previamente calculada de traçador num sumidouro e no monitoramento das ressurgências com a utilização de captosres de carvão ativado.

O traçador foi injetado nos sumidouros pelo método da injeção instantânea. Neste processo, a rodamina diluída em água é injetada instantaneamente num sumidouro que apresente fluxo turbulento, para garantir a perfeita diluição do traçador e impedir sua decantação (RANTZ 1982). Vários autores elaboraram fórmulas para calcular a quantidade de traçador a ser utilizada em testes de conexão hidráulica. Uma síntese destes trabalhos (KÄSS 1992) concluiu que essas fórmulas devem ser utilizadas somente como ponto de partida para a estimativa da quantidade a ser injetada. A prática tem demonstrado que a determinação da quantidade ideal depende do conhecimento da região estudada e da experiência do técnico na aplicação de traçadores. Neste trabalho, a fórmula apresentada por ALEY & FLETCHER (1976) (1) foi utilizada como base para a definição da quantidade de traçador a ser injetada nos testes.

$$VD = 1,19.F \left(\frac{Q.L}{V} \right).Cp \quad (1)$$

onde:

VD – massa de rodamina (g) a ser utilizada na solução de injeção;

F – fator de concentração; definido como a razão entre o coeficiente 0,4 e a concentração da rodamina (por exemplo, para rodamina a 50%, $F=0,4/0,5$). O coeficiente 0,4 corresponde a um parâmetro empírico definido pelos autores;

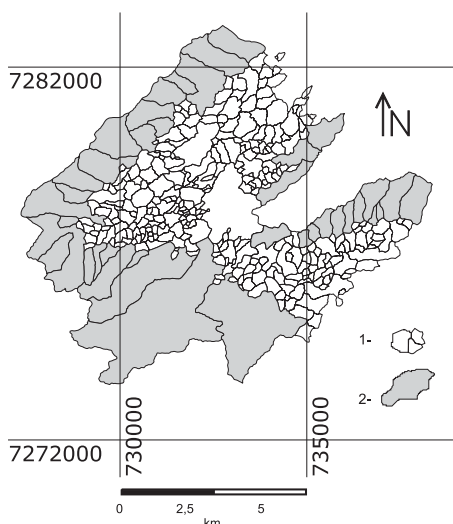


FIGURA 3 - Depressões fechadas da zona de recarga autóctone (1) e vales cegos da zona de recarga alóctone (2) (Modificado de Karmann 1994).

- Q – vazão média estimada do fluxo em m^3/s ;
 V – velocidade estimada do fluxo em m/s ;
 L – distância em linha reta, medida em mapa do sumidouro até o ponto de ressurgência, expressa em km;
 C_p – concentração máxima do traçador em ppb, esperada nas águas da ressurgência.

A função dos captore de carvão ativado é registrar a passagem do traçador nos pontos investigados. São instalados antes do teste e recolhidos ou substituídos por outros, num período de tempo considerado suficiente para a passagem do traçador. O uso dos captore diminui o custo do experimento, pois dispensa a coleta sistemática de amostras de água nos pontos de monitoramento. Os captore utilizados foram confeccionados com uma tela de nylon de 0,4 mm de malha, num formato de envelope (14 x 4 cm), e preenchidos com carvão ativado na granulometria de 1 a 2 mm, conforme sugerido por BENISCHKE (1999).

Após a realização de cada teste, os captore foram recolhidos e levados ao laboratório, onde foram “lavados” com um eluente. O objetivo deste procedimento é extrair a rodamina que pode estar retida no captore. Neste trabalho optou-se pela utilização do

eluente composto por etanol p.a (96% v/v) e KOH p.a (15% p/v em H_2O), homogeneizados na proporção 1:1. Sua utilização levou em conta principalmente a praticidade de manuseio do produto e o baixo custo, se comparado a outros eluentes sugeridos na literatura (SMART & BROWN 1973, ALEY & FLETCHER *op. cit.*, JONES 1984, e KÄSS *op. cit.*). Detalhes da eluição do carvão ativado podem ser encontrados em GENTHNER (2001). Para quantificar a concentração da rodamina na solução resultante da eluição, foi utilizado um espectrofluorímetro Turner TD-700. A concentração obtida no produto da eluição não reflete a concentração do traçador nas águas da ressurgência durante a realização do teste, mas, a quantidade acumulada pelo carvão ativado ao longo do período de exposição no ponto de monitoramento.

A presença de algas e sedimentos no produto da eluição pode emitir uma fluorescência similar a da rodamina, mas não associada à presença do traçador na amostra (SMART 1976, SMART & SMITH 1976, SMART & LAIDLAW 1977, AYUB 1998). Quando esta fluorescência natural não é considerada, corre-se o risco de interpretar resultados negativos como positivos. Para evitar falsos positivos é necessário monitorar a fluorescência natural antes do início do teste qualitativo. Neste trabalho adotou-se como



FIGURA 4 - Modelo digital do terreno do planalto cárstico e zonas circunvizinhas. Destaque para as zonas de recarga e descarga do planalto.

norma monitorar o nível de fluorescência nas ressurgências antes e após a realização dos testes.

4 OS SUMIDOUROS E RESSURGÊNCIAS INVESTIGADOS

A estratégia para testar as conexões entre pontos de entrada e saída de água na porção SW do corpo carbonático Lajeado-Bombas foi baseada em modelos conceituais de circulação das águas subterrâneas elaborados para esta área (KARMANN 1994), na análise de mapas topográficos, geológicos, fotografias aéreas, banco de dados da Sociedade Brasileira de Espeleologia e entrevistas de campo. Foram selecionados para o presente estudo sumidouros com drenagens perenes e pontos de ressurgência da água subterrânea. A figura 5 apresenta a distribuição dos pontos de injeção e monitoramento.

Dos sumidouros selecionados, oito estão associados a zonas de recarga alóctone e dois a zonas de recarga autóctone. A conexão destes pontos foi testada com seis ressurgências, com os afluentes subterrâneos do sistema de cavernas Areias (conectado à janela cárstica das Areias) e com o rio Bombas. Cabe uma breve descrição das fontes cársticas investigadas.

Ressurgências no vale do rio Betari. A gruta do Laboratório é uma das principais ressurgências do sistema, com uma vazão média anual da ordem de 0,64 m³/s e valores máximos que podem chegar a 4,4 m³/s. Trata-se de uma gruta com 300 metros de desenvolvimento; o rio subterrâneo, de regime perene, ressurge de um sifão localizado no fundo da caverna. Recentemente, um outro trecho da caverna foi descoberto após o sifão.

O lago do Bairro da Serra é uma ressurgência de regime perene, com vazão média anual de 0,28 m³/s e valores máximos que podem chegar a 0,45 m³/s. Esta ressurgência apresenta características de ressurgências vaclusianas (*vaclusian spring*, BÖGLI 1980). É alimentada por um conduto ascendente que intercepta os depósitos sedimentares da várzea do rio Betari e forma um pequeno lago que é drenado por um canal fluvial conectado ao rio Betari.

A ressurgência do córrego Seco está associada a uma gruta de padrão ascendente com menos de 30 metros de desenvolvimento. O rio de regime intermitente ressurge de um sifão localizado no fundo da gruta. O padrão ascendente da caverna sugere tratar-se de uma ressurgência do tipo vaclusiana. Uma medida de vazão obtida durante um período de atividade da ressurgência apresentou o valor de 0,47 m³/s. Este va-

lor não reflete a capacidade de drenagem deste exutório; pelo relato dos moradores, estima-se que o débito pode atingir valores até 10 vezes maiores que o medido.

Ressurgências do rio Bombas e imediações. A ressurgência de Bombas é uma fonte perene localizada entre blocos abatidos e não está associada a galerias subterrâneas acessíveis. Uma vez que o rio Bombas corta o planalto cárstico no setor sul, suas águas foram monitoradas, pois podem drenar ressurgências ainda não conhecidas.

A gruta Jeremias é uma fonte perene, associada a uma caverna horizontal com 1275 metros de desenvolvimento, que drena suas águas diretamente para o rio Ribeira de Iguape. O rio subterrâneo ressurge num sifão dentro da caverna.

Sistema subterrâneo Areias. Trata-se do maior sistema de cavernas do planalto cárstico. O sistema é interceptado por uma janela cárstica (*karst window*, BÖGLI *op. cit.*) que permite o acesso à rede de condutos subterrâneos. A somatória do desenvolvimento de condutos a norte e a sul desta entrada totaliza 4.800 m. O padrão morfológico planimétrico da caverna é dendrítico. O conduto principal drena três rios perenes e possivelmente alguns efêmeros. O rio principal e os afluentes foram monitorados durante os testes qualitativos.

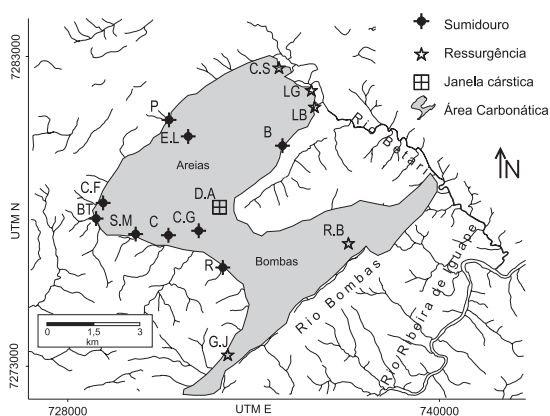


FIGURA 5 - Localização dos pontos de injeção do traçador e fontes monitoradas. C.F – Abismo Córrego Fundo; L.B- Gruta Laboratório; L.G- Lago do Bairro da Serra; C.S- Gruta Córrego Seco; C- Córrego Carniça; C.G- Córrego Grande; R- Abismo Roncador; P- Abismo Paçoca; B- Abismo Berta do Leão; B.T- Córrego Batalha; S.M – Córrego Sebastião Machado; D.A – Dolina das Areias; R.B- Ressurgência Bombas; G.J- Gruta Jeremias; E.L- Escola Lajeado.

5 OS TESTES REALIZADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS

A partir da definição dos pontos de injeção e monitoramento, a equação (1) foi utilizada como referência para a determinação da quantidade de traçador a ser injetada nos testes. A vazão de 0,85 m³/s, a velocidade de fluxo de 0,86 m/s (obtidas na gruta do Laboratório) e o valor de 40 ppb (arbitrário) como concentração máxima esperada na ressurgência foram utilizados na equação. A tabela 1 apresenta os valores calculados e as quantida-

des efetivamente injetadas.

Foram realizados 10 testes qualitativos. O tempo de exposição dos captadores de carvão ativado nos pontos de monitoramento variou de sete a vinte e três dias. Dois testes foram realizados no sumidouro córrego Fundo; num dos testes, a ressurgência intermitente do córrego Seco estava ativa. A tabela 2 apresenta uma síntese dos testes realizados e os resultados obtidos; são exibidos os valores de fluorescência dos pontos investigados antes (*background*) e após a injeção do traçador.

TABELA 1 - Quantidade de rodamina calculada pela equação 1 e efetivamente injetada nos sumidouros selecionados. Ingrediente Ativo da rodamina = 50% , F = 0,80, vazão 0,85m³/s e velocidade 0,86 m/s.

Local de Injeção	Ponto Monitorado	Desnível (m)	Distância (km)	Rodamina Calculada (g)	Rodamina Injetada (g)
Gruta do Córrego Fundo	Gr. Laboratório	330	7,4901	281,91	120 (teste 1)
	Lago do B. da Serra	330	7,6335	287,30	
	Gr. Córrego Seco	290	7,1508	269,14	300 (teste 2)
Sumidouro do Córrego Carniça	Gr. Laboratório	160	6,2678	235,90	100
	Lago do B. da Serra	165	6,5582	246,83	
	Córrego Seco	120	6,4636	243,27	
Sumidouro do Córrego Grande	Gr. Laboratório	150	5,4635	205,63	200
	Lago do B. da Serra	150	5,7996	218,28	
	Gr. Córrego Seco	110	5,8520	220,25	
	Ress. Bombas	110	4,8515	182,60	
	Gr. Jeremias	-15	4,1746	157,12	
Abismo do Roncador	Gr. Laboratório	250	5,9571	224,21	200
	Lago do B. da Serra	250	6,3805	240,15	
	Córrego Seco	210	6,6837	251,56	
	Ress. Bombas	210	4,1267	155,32	
	Gr. Jeremias	85	2,9652	111,60	
Abismo da Passoca	Gr. Laboratório	290	4,7180	177,57	150
	Lago do B. da Serra	290	4,6902	176,53	
	Córrego Seco	250	3,9241	147,69	
Sumidouro do Córrego Batalha	Gr. Laboratório	290	7,9133	297,84	300
	Lago do B. da Serra	290	8,0799	304,10	
	Córrego Seco	250	7,6429	287,66	
Sumidouro do Córrego Seb. Machado	Gr. Laboratório	310	7,0767	266,35	300
	Lago do B. da Serra	310	7,3178	275,42	
	Córrego Seco	270	7,0761	266,33	
Abismo Berta Leão I	Gr. Laboratório	30	1,6120	60,67	30
	Lago do B. da Serra	30	2,0012	75,32	
	Córrego Seco	10	2,5017	94,16	
Escola Lajeado	Gruta Areias	200	2,4888	93,65	50

18

PONTOS MONITORADOS																							
PONTOS DE INJEÇÃO	Período de exposição do captor no ponto de monitoramento durante o teste (dias)		GRUTA AREIAS DE CIMA																				
	Gruta do Jeremias		Rio Taquaruvira		Ressurgência Bombas		Gruta do Laboratório		Lago do Bairro da Serra		Ressurgência Córrego Seco		Galeria Seca				Ramo esquerdo		Afluente da entrada		Depressão das areias		
													B	T	B	T	B	T	B	T	B	T	B
Abismo Berta do Leão	nt	nt	nt	nt	nt	2,42	10,24	2,35	3,20	0,23	0,15	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt
	nt	nt	nt	nt	nt	3,12	77,20	3,12	1,37	0,39	0,82	3,12	1,3	nt	nt	nt	202,31	nt	nt	3,12	64,56		
	nt	nt	nt	nt	nt	3,98	16,84	2,52	-	0,68	-	3,98	0,46	nt	nt	nt	82,56	nt	nt	2,97	86,21		
	nt	nt	nt	nt	nt	5,16	2,06	3,93	9,19	1,18	7,81	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	3,06	1,92		
Sum. Córrego Fundo 1ª injeção	nt	nt	nt	nt	nt	6,22	6,44	8,25	31,97	-	-	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	7,98	5,43		
Sum. Córrego Fundo 2ª injeção	nt	nt	nt	nt	nt	1,56	2,62	3,17	9,65	2,85	28,78	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	4,44	4,97		
Sum. Passóca	nt	nt	nt	nt	nt	2,45	3,51	3,37	4,45	nt	nt	2,45	4,85	nt	nt	2,45	2,92	nt	nt	1,17	4,17		
Sum. Roncador	3,35	7,77	3,35	3,35	1,47	8,22	3,51	3,37	4,45	1,24	0,92	5,42	5,96	5,42	30,03	5,42	30,03	5,42	6,33	4,64	143,42		
Sum. Batalha	nt	nt	nt	nt	nt	5,42	39,36	4,68	4,45	1,24	0,92	nt	5,96	nt	nt	nt	2,04	nt	nt	4,35	7,99		
Sum. Córrego Grande	nt	nt	3,81	3,92	0,73	3,5	5,99	4,41	4,68	nt	nt	3,11	3,10	4,35	20,01	nt	2,04	nt	nt	4,35	7,99		
Escola Lajeado	nt	nt	nt	nt	nt	nt	nt	3,31	4,33	nt	nt	nt	nt	nt	nt	3,20	3,39	3,20	6,17	3,20	4,70		

6 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados da tabela 2 mostram que em alguns experimentos é observado um forte contraste entre o valor de *background* e o valor obtido com o teste, nestes casos, a conexão hidráulica entre o ponto de injeção e o de monitoramento é prontamente confirmada. No entanto, esta situação não é observada em todos os testes. Em função das características de cada rota (retenção da rodamina em sedimentos, desvio de parte da pluma do traçador para outras passagens e diluição excessiva), nem sempre o resultado será tão claro. Outros fatores que contribuem para esta incerteza são a variação da fluorescência natural da região e a influência de testes anteriores realizados na mesma rota.

Como pode ser observado na tabela 2, as ressurgências gruta do Laboratório, lago do Bairro da Serra e depressão das Areias foram constantemente monitoradas. Os valores de *background* nestes pontos variaram de 1,17 a 8,25 ppb, com valor médio de 3,9 ppb e desvio padrão de 1,64 ppb. Assumindo que estes pontos são representativos para a área estudada, o valor médio foi adotado como o valor da fluorescência natural da região. Utilizando este valor como referência, duas hipóteses são propostas para interpretar os resultados dos testes:

- Hipótese 1. Considera-se o resultado positivo quando a diferença entre o *background* e o resultado do teste é superior à média (3,90 ppb). Segundo este critério, basta que a diferença supere o valor médio da fluorescência natural da região para que um resultado seja positivo;
- Hipótese 2. Considera-se o resultado positivo quando a diferença entre o *background* e o resultado do teste é superior à soma da média e desvio padrão (5,54 ppb). Este critério é mais rígido que o anterior, pois a diferença deve superar a média e sua variação para positivar um teste.

Ambos os critérios foram adotados, pois a variabilidade observada no *background* impede que a média seja considerada como limiar para a interpretação dos resultados. Outra opção seria considerar positivos os resultados que superassem a diferença entre o maior e o menor valor de *background* obtido nas ressurgências (7,08). No entanto, este valor seria muito rígido, pois nenhuma das ressurgências monitoradas apresenta uma amplitude tão elevada.

A tabela 3 apresenta uma síntese da interpretação dos testes, considerando as duas hipóteses. Baseado nos dados da tabela 3 e na organização dos condutos do sistema Areias, o arranjo espacial das conexões hidrológicas é apresentado na figura 6.

Resultados dúbios (positivo para a hipótese 1 e negativo para a hipótese 2) foram observados em três experimentos: Roncador/Jeremias, Escola Lajeado/afluente de entrada e córrego Fundo (primeira injeção)/lago do Bairro da Serra. Para os dois primeiros, a confirmação depende da repetição do teste. A conexão córrego Fundo/lago do Bairro da Serra pode ser eliminada do grupo de resultados duvidosos, se considerarmos os dados do segundo experimento.

Os resultados observados nos testes do sumidouro córrego Fundo permitem inferir sobre características do arranjo das rotas de fluxo no setor NW do carste e devem ser compreendidos a partir das condições hidrológicas do sistema durante a realização dos testes. O primeiro teste foi realizado num período chuvoso, com a ressurgência intermitente do córrego Seco em atividade. Nesta condição, observamos resultado positivo para o córrego Seco e resultado duvidoso para o lago do Bairro da Serra. O segundo teste foi realizado num período de estiagem, com a ressurgência do córrego Seco desativada. Nesta situação, o resultado foi positivo para o lago e negativo para o córrego Seco.

Os resultados indicam que nos períodos de estiagem a rota do lago é suficiente para escoar as águas da área de recarga. No entanto, durante chuvas intensas, esta rota não dá vazão ao volume infiltrado e é o córrego Seco que deságua o excesso. O caráter distributivo desta porção do sistema também é confirmado pelo experimento no sumidouro da Paçoca. Durante sua realização, a ressurgência do córrego Seco estava em atividade, e o resultado foi positivo para este ponto e também para o lago.

A área central do carste, drenada pela ressurgência da gruta Laboratório, apresenta uma drenagem subterrânea de estrutura convergente. A maior parte das drenagens autóctones provenientes da serra da Anta Gorda, converge inicialmente para a janela cárstica das Areias, sendo que parte do percurso é realizado através dos condutos da gruta Areias de Cima. O volume que chega na janela cárstica segue para a ressurgência do Laboratório, parte da conexão é realizada através da gruta Areias de Baixo. O trecho final ainda recebe as drenagens autóctones concentradas no sumidouro Berta do Leão.

20

[illegible]

O resultado obtido no experimento da Escola Lajeado pode ser um indicador de que a janela cárstica das Areias também concentra as drenagens autóctones desta região. Este experimento foi realizado num período de estiagem, quando o traçador infiltra-se nos aluviões. Nesta situação, parte do corante pode ficar retida nos sedimentos, resultando numa baixa concentração no ponto de monitoramento.

Os resultados obtidos na região de Bombas não permitem afirmar se a drenagem é do tipo convergente ou divergente. Considerando a hipótese 1, as águas da serra da Anta Gorda, que são injetadas no abismo Roncador, são distribuídas para as ressurgências de Bombas e da gruta Jeremias. Se utilizarmos um padrão mais rígido para interpretar os resultados (hipótese 2), então, a área drenada pelo abismo Roncador deságua apenas na ressurgência de Bombas. A gruta Jeremias dá vazão às águas provenientes da área localizada ao sul do Roncador.

7 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA

Os resultados mostram que três sistemas subterrâneos drenam a área de estudo: sistema córrego

Fundo, sistema Areias e sistema Bombas. Considerando o arranjo espacial das conexões, uma primeira aproximação das áreas de recarga dos sistemas é proposta (Figura 7).

O sistema córrego Fundo, localizado no setor noroeste da área, é abastecido principalmente pelas drenagens alóctones da serra da Biquinha. Está posicionado no flanco NW da estrutura sinclinal da região das Areias. A zona de contato entre o calcário e os filitos da serra constitui o eixo predominante de desenvolvimento desta rota. Este eixo conecta a zona de recarga com a zona de descarga do vale do rio Betari. Trata-se de um sistema de padrão divergente que distribui as águas infiltradas entre as ressurgências do córrego Seco e lago do Bairro da Serra.

O sistema Areias ocupa a maior parte da região do Lajeado. É abastecido pelas drenagens alóctones da serra da Anta Gorda e por uma extensa malha de depressões fechadas. A dolina das Areias representa um nível de base no interior do planalto, para onde convergem as águas injetadas pela serra da Anta Gorda e parte das águas coletadas pelo conjunto de depressões poligonais. Este sistema ocupa a área central e o flanco SE do sinclinal do Lajeado. A ressurgência do sistema (gruta La-

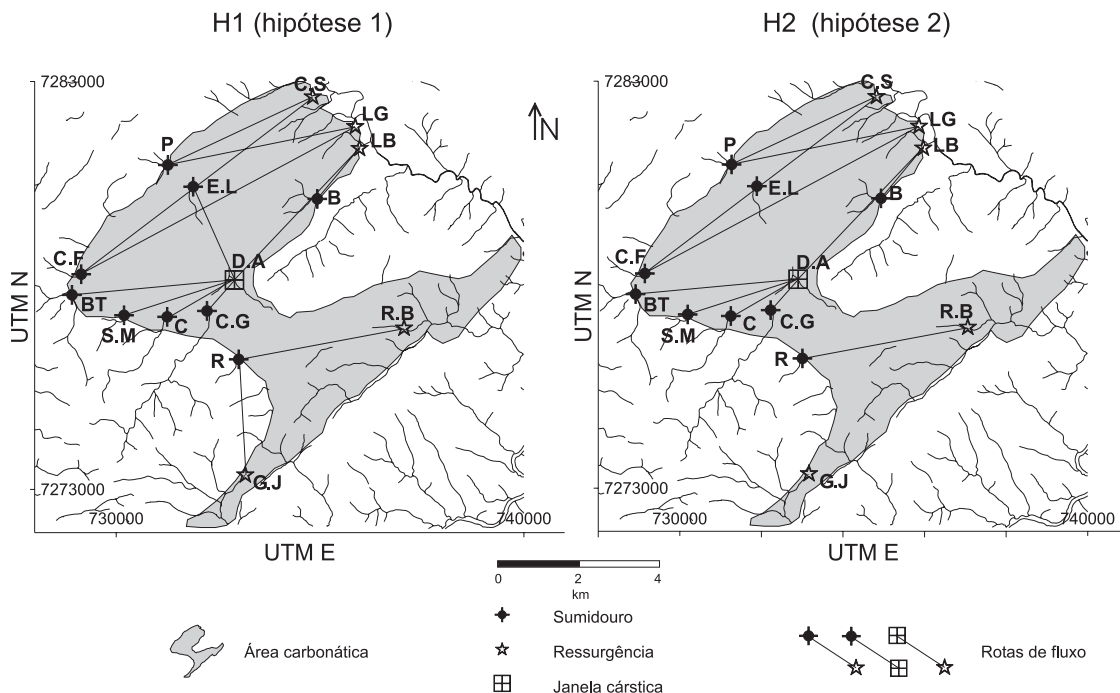


FIGURA 6 - Arranjo espacial das conexões hidrológicas, baseados nas hipóteses 1 e 2.

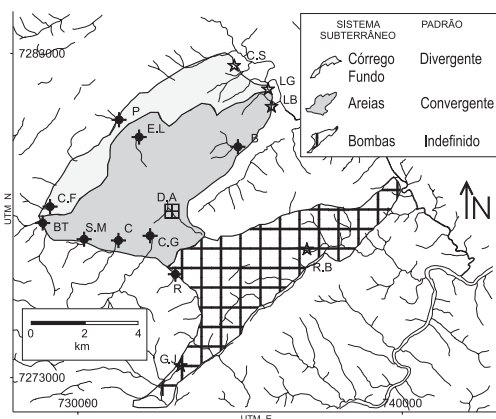


FIGURA 7 - Delimitação das zonas de recarga dos sistemas de drenagem subterrânea no planalto cárstico Lajeado-Bombas.

boratório) desenvolve-se na zona de contato do calcário com os filitos da serra do Sem Fim. Trata-se de um sistema de padrão convergente; a gruta Laboratório concentra as águas injetadas por recarga alóctone e autóctone. Considerando o padrão dendrítico da principal caverna associada a esta área, supõe-se que o arranjo da drenagem subterrânea siga este mesmo padrão.

Além das drenagens autóctones, o sistema Bombas também drena rios provenientes da serra da Anta Gorda e da serra do Sem Fim. Águas injetadas pela serra da Anta Gorda (sumidouro Roncador) reaparecem na ressurgência de Bombas e seguem para o rio Ribeira através do rio Bombas. Em seu percurso, esta rota cruza o eixo de um anticlinal de flanco invertido. Os resultados obtidos não permitem estabelecer o padrão deste sistema, pesquisas mais aprofundadas são necessárias.

8 CONCLUSÕES

Os testes realizados com o uso do traçador rodamina FWT no planalto cárstico Lajeado-Bombas levaram à identificação de três sistemas de drenagem subterrânea. O arranjo das conexões hidrológicas mostrou que no mesmo corpo carbonático coexistem diferentes padrões de drenagem cárstica, divergente e convergente. Estudos mais detalhados devem ser aplicados na região de Bombas, para a identificação e tipificação de outros sistemas de drenagem subterrâneos.

Os resultados obtidos mostram que a identificação de conexões hidrológicas entre

sumidouros e ressurgências utilizando a rodamina FWT e detectores de carvão ativado é um método viável no contexto fisiográfico das paisagens cársticas do vale do Rio Ribeira de Iguape.

9 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento da pesquisa (processo: 99/12672-4) e concessão de bolsa de mestrado a Claudio Genthner (processo: 99/07288-0). Ao PETAR e à Pousada Rancho da Serra, pelo apoio logístico. Aos motoristas do IG-SMA, aos alunos Leandro Canaver, Leandro, Fabrício e Ana Claudia do IG-USP e aos estagiários Adhin Santiago e Claudinei Lopes Santana do IG-SMA, pelo apoio nos trabalhos de campo. Aos moradores do Bairro da Serra, Jurandir, Jamar e Edilson nossos guias na floresta, muito obrigado.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEY, T.; FLETCHER, M.W. 1976. Water tracers cookbook. Missouri Speleology, 3 16:1-3
- ALONSO, M.T.A. 1977. Geografia do Brasil - Região Sudeste. IBGE - Rio de Janeiro. 667 p.
- AYUB, S. 1998. Aplicação do corante traçador fluorescente Rodamina-WT no estudo hidrológico e hidrogeológico dos sistemas cársticos Pérolas - Santana, Grilo e Zezo, Município de Iporanga, Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 104p.
- BENISCHKE, R. 1999. Fluorescent tracers in hydrology: principles, instrumentation, physico-chemical, properties, analytics. Austria: Institute of Hydrogeology and Geothermics, Joanneum Research, 64 p.
- BÖGLI, A. 1980. Karst hydrology and physical speleology. Springer Verlag, Berlin, 303 p.
- CAMPANHA, G.A.C. 1991. Tectônica proterozóica no alto e médio vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 296 p.

- DOMINGOS, M. D. 2002. Limnologia do rio Betari (Iporanga, SP) e a relação com o estado de conservação de sua bacia hidrográfica – subsídios para o desenvolvimento sustentável. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, Tese de Doutorado, 272 p.
- FIELD, M.S. 1999. The QTRACER Program for tracer-breakthrough curve analysis for karst and fractured-rock aquifers, Office of Research and Development, Washington DC, EPA/600/R-98/156a.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. 1989. Karst geomorphology and hidrology. Chapman & Hall, 601 p.
- GENTHNER, C. 2001. Aplicação do traçador fluorescente rodamina-wt no estudo geohidrológico da área carbonática Lajeado-Bombas, Vale do Betari, Sul do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 95p.
- GUTJAHR, M. R. 1993. Critérios relacionados à compartimentação climática de bacias hidrográficas: a bacia do rio Ribeira de Iguape. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 90 p.
- IPT, 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Volume I. São Paulo, IPT, 94 p. (Publicação Especial).
- JONES, W.K. 1984. Dye tracer tests in karst areas. National Speleological Society Bulletin – Water Tracing Special Issue, 46: 3-9.
- KARMANN, I. 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do Rio Ribeira do Iguape, sudeste do estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 228 p.
- KÄSS, W. 1992. Geohydrologische Markierungstechnik. In: Lehrbuch der Hydrogeologie, Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 519p. (Volume 9).
- KIRALY, L. 1998. Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. Bulletin d'Hydrogéologie, (16): 77-98
- RANTZ, S.E. 1982. Measurement and computation of stream flow: measurement of stage and discharge. United States Geological Survey - Water Supply Paper, 2175(1), 284p.
- SMART, P.L.; BROWN, M.C. 1973. The use of activated carbon for the detection of the tracer dye rhodamine WT. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 6, Oloumouc, Proceedings, 285-292.
- SMART, P.L.; LAIDLAW, I.M.S. 1977. Evaluation of some fluorescent dyes for water tracing. Water Resources Research, 1(13):15-33.
- SMART, P.L.; SMITH, D.I. 1976. Water tracing in tropical regions, the use of fluorometric techniques in Jamaica. Journal of Hydrology, 30: 179-195.
- SMART, P.L. 1976. Use of optical brightener/cellulose detector system for water tracing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF UNDERGROUND WATER TRACING, 3, Ljubjana, Proceedings, 203-210.
- TAVARES, R.; GUTJHAR, M. R. 1999. Contribuição ao conhecimento do meio físico no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira - PETAR (Apiá e Iporanga, SP) – Capítulo IV: Clima. São Paulo: Instituto Geológico – SMA, 237p. (Relatório Interno).
- WORTHINGTON, S.R.H. 1991. Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains. Department of Geography, McMaster University, Hamilton, PhD Thesis, 227 pg.

Endereço dos autores:

Claudio Genthner: Angel Geologia e Meio Ambiente. E-mail: claudio.genthner@angelgeologia.com.br

José Antonio Ferrari: Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, Av. Miguel Stefano 3900, CEP 04301-903, São Paulo, SP. E-mail: ferrari@igeologico.sp.gov.br

Ivo Karmann: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, Cidade Universitária, CEP 05508-900, São Paulo, SP. E-mail: ikarmann@usp.br