

ANÁLISE PRELIMINAR DOS ASPECTOS GEOTÉRMICOS DAS FONTES TERMAIS BRASILEIRAS

S.J. HURTER e V.M. HAMZA

Instituto Astronômico e Geofísico — USP — Caixa Postal 30627 — 01000 — São Paulo — SP

S.S.S. IVER e M.I. COSTA

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares — IPEN — Caixa Postal 11049 — Cidade Universitária — 01000 — São Paulo — SP

Information on more than 400 geothermal springs in Brazil has been assembled. On the basis of the data collected the temperatures at the maximum depths of circulation of spring waters are calculated using the quantity of silica dissolved in water. For some thermal springs temperatures are calculated on the basis of silica determination carried out by us. Applying linear relations between silica temperature and geothermal flux the average depths of water circulation in the Paraná Basin and the Brazilian folded belts surrounding the San Francisco craton are calculated. The radioactivity of the water, derived mainly from the dissolved radon can be correlated with the temperature of the spring. An inverse correlation, as was observed for thermal springs of Poços de Caldas, can be used to calculate the ascent velocity of thermal waters, where as, a positive correlations could be interpreted as due to the mixing of thermal with surface waters.

INTRODUÇÃO

As fontes ou nascentes são saídas naturais para águas contidas em reservas no subsolo. A composição química dos solutos encontrados nestas águas varia muito, conforme a natureza do meio em que circularam. Quando, nestas fontes, as águas contêm quantidades acima do normal de sais dissolvidos, as fontes passam a receber o nome de "fontes minerais". Sais como o carbonato e sulfato de cálcio em maiores quantidades tornam a água salobra ("bitter springs"), enquanto que teores perceptíveis de ferro, magnésio, enxofre e outros elementos são considerados de efeito medicinal (fontes ferruginosas, magnesianas, sulfurosas, etc.).

Águas que se originam ou que circulam nas profundas camadas da crosta, adquirem a temperatura das formações rochosas com as quais entram em contato e passam a ser designadas "águas termais".

Existem dois tipos de fontes termais:

1. originadas por águas meteóricas que penetram no subsolo através de fraturas, sistemas de juntas e formações permeáveis, são aquecidas em profundidade e reaparecem após certo tempo na superfície;
2. originadas por águas juvenis, isto é, águas provindas das profundezas da crosta, derivadas de magmas e que emergem pela primeira vez à superfície.

Normalmente as águas termais são classificadas em cinco grupos segundo sua temperatura; atermais ($< 25^{\circ}\text{C}$), hipotermas ($25^{\circ}\text{C} - 33^{\circ}\text{C}$), mesotermas ($33^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C}$), isotermas ($36^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C}$), e hipertermas ($> 38^{\circ}\text{C}$).

No entanto, esta classificação não é baseada em nenhum critério geotérmico. Uma fonte para ser atermal ou termal depende de diversos fatores tais como o regime termal da crosta, a profundidade de circulação das águas, a perda de calor durante a ascensão das mesmas através de fraturas e o grau de mistura com águas superficiais.

A composição química destas águas reflete a natureza do meio em que circularam. Determinados elementos, presentes na maioria das rochas, tem sua solubilidade controlada pela temperatura deste meio. Quando a perda de calor é pequena na ascensão das águas e esta ascensão é rápida de modo a alterar pouco a composição química das águas em questão, a análise destes elementos dissolvidos pode ser usada para inferir temperaturas em profundidade. A estas substâncias que possibilitam tais estudos, dá-se o nome de geotermômetros químicos. Como exemplo citamos a sílica (SiO_2), que está presente em quantidades significantes em praticamente todas as rochas da crosta.

A radioatividade das águas termais está relacionada com a variação da abundância dos elementos radioativos com a profundidade, o tipo de litologia regional, o grau de mistura com águas de outros aquíferos e o tempo de circulação em profundidade. Já foram feitos estudos (Felmlee e Cadigan, 1978), nos quais radônio e rádio dissolvidos em águas foram analisados visando desenvolver um método geofísico para a prospecção de urânio. A radioatividade das águas também é capaz de fornecer informações sobre a distribuição do calor radiogênico na crosta superior.



Figura 1 — Distribuição geográfica das fontes termais (os pontos indicam a localização dos principais sistemas de fontes).

Assim, as características físico-químicas das águas termais estão intimamente ligadas ao regime geotermal da crosta. No Brasil não há estudos sistemáticos sobre os aspectos geotérmicos das águas termais (Hamza, 1978). O objetivo principal do presente trabalho é apresentar resultados preliminares de pesquisas geotérmicas relacionados às fontes termais no país.

DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES TERMAIS

Na primeira fase do trabalho foram coletadas informações sobre a maioria das fontes termais do Brasil. Neste estágio foram cadastradas mais de 400 fontes termais. Na maioria dos casos, os dados existentes sobre temperatura, composição química e radioatividade apresentam diferenças significantes entre si. Apesar disso, estes dados fornecem algumas características gerais das águas termais. Na Fig. 1 apresentamos a distribuição geográfica das fontes cadastradas. A maioria delas está

localizada nas partes sul e sudeste do país. A falta de informações adequadas não permite uma análise completa das fontes nas regiões norte e noroeste. Entretanto, é interessante notar na região leste que o craton do São Francisco está praticamente livre das fontes termais. A maior parte das fontes está distribuída ao redor do craton, na faixa de Dobramentos Brasileiros. Provavelmente a existência de fraturas e falhamentos ao redor do craton facilita a penetração e circulação de águas em profundidade, dando origem a fontes termais e termominerais.

TEMPERATURA EM PROFUNDIDADE

Informações sobre temperatura e profundidade de circulação das águas termais podem ser obtidas pelo uso de termômetros geoquímicos. O princípio do termômetro geoquímico é a dependência entre temperatura e solubilidade de certas substâncias na água. Exis-

tem atualmente dois termômetros geoquímicos que fornecem dados razoavelmente representativos: os geotermômetros de sílica e o de sódio-potássio-cálcio.

O geotermômetro de sílica se baseia na dependência térmica da solubilidade do quartzo (SiO_2) em água e é normalmente aplicado para estimar temperaturas de reservatórios de sistemas geotermiais em profundidade.

A temperatura está relacionada com o teor de SiO_2 dissolvido pela expressão geral:

$$Q = \exp(C_2 - C_1/T), \quad (1)$$

onde: Q é a quantidade de SiO_2 dissolvido em ppm e
T é a temperatura absoluta em $^\circ\text{K}$.

os valores das constantes C_1 e C_2 fornecidos por Truesdell (1976) são substituídos na equação (1) para obter a temperatura em $^\circ\text{C}$.

$$T_{\text{SiO}_2} = \frac{1315}{5.205 - \log_{10} Q} - 273.15, \quad (2)$$

onde: T_{SiO_2} é a geotemperatura da sílica em $^\circ\text{C}$.

Equações semelhantes à (2) existem quando se consideram outras formas de sílica que não o quartzo (sílica amorfa, calcedônia, cristobalita), que têm solubilidades diferentes à uma mesma temperatura. O geotermômetro de Na-K-Ca também é dado por uma equação semelhante. No presente trabalho foram calculados a geotemperatura da sílica (T_{SiO_2}) empregando a equação (2) e utilizando os dados disponíveis.

Na Tabela 1 é apresentada uma lista preliminar de fontes termiais com dados de teor de sílica tirados da bibliografia e respectivas geotemperaturas calculadas pela equação (2). As diferenças no teor de sílica de uma mesma fonte são principalmente devido aos diferentes métodos analíticos utilizados pelos diversos autores. Costa et al. (1980) sugerem que a técnica mais apropriada para determinação de sílica em águas geotermiais é o método do ácido molibdo-silícico por espectrofotometria. Este método é recomendado pela American Public Health Association (1976), para análise de baixos teores de sílica em águas praticamente puras, e consta das seguintes etapas:

1. Digere-se uma alíquota da amostra com 200 mg de bicarbonato de sódio em cápsula de platina por uma hora em banho-maria para que toda sílica se torne reativa ao molibdato de amônia.
2. Adiciona-se 2,4 ml de solução de ácido sulfúrico 1 N e transfere-se quantitativamente para um balão volumétrico de 25 ml.
3. Adiciona-se 1,0 ml de solução de ácido clorídrico 1:1 e 2,0 ml de solução de molibdato de amônia

(10% em pH entre 7 e 8). Agita-se o frasco, aguarda-se 5 a 10 minutos, adiciona-se 1,5 ml de solução de ácido oxálico 10% e completa-se o volume com água bidestilada.

4. Entre 2 a 15 minutos após a adição do ácido oxálico efetua-se a medida de absorvância em espectrômetro ajustado em 410 nm. Compara-se a absorvância da amostra com uma curva padrão, construída com absorvância versus quantidades conhecidas de sílica e daí, obtém-se a concentração dessa amostra.

A Tabela 2 fornece os resultados de algumas análises efetuadas no presente trabalho através deste método.

RELAÇÃO ENTRE T_{SiO_2} E FLUXO GEOTÉRMICO

Recentemente Swanberg e Morgan (1978) sugeriram uma relação linear entre a geotemperatura da sílica (T_{SiO_2}) e o fluxo geotérmico (q), dada por:

$$T_{\text{SiO}_2} = m \cdot q + n \quad (3)$$

onde: m, n são constantes.

A constante n é interpretada como temperatura média anual da superfície, onde o efeito do fluxo geotérmico pode ser considerado nulo. O coeficiente angular da reta m, multiplicado pela condutividade térmica (λ) das rochas da área em questão, tem dimensão de profundidade e reflete a profundidade média na qual as águas subterrâneas circulam. No caso destas águas contribuírem com uma componente de convecção no fluxo térmico total ou se ocorrer precipitação de sílica, esta profundidade é a profundidade mínima de circulação das águas.

No presente caso apresentamos na Fig. 2 a relação entre T_{SiO_2} e 'q' para fontes localizadas em terrenos de dobramentos brasileiros e da Bacia do Paraná. Os valores médios calculados são apresentadas na Tabela 3.

Seguindo a prática de Swanberg e Morgan (1978) adotamos 2,1 W/m $^\circ\text{C}$ como o valor médio representativo de condutividade térmica para rochas sedimentares e 3,0 W/m $^\circ\text{C}$ como valor médio para rochas cristalinas encontradas em regiões precambrianas. Usando estes valores a profundidade média de circulação de água na Bacia do Paraná é cerca de 1,9 km, que também representa aproximadamente a profundidade máxima do aquífero Botucatu. Nos Dobramentos Brasileiros a profundidade de circulação se encontra a cerca de 3,1 km, implicando numa circulação bastante profunda de águas subterrâneas através de falhas pré-cambrianas. É importante ressaltar que estes valores somente devem ser considerados de caráter preliminar, dada a falta de dados adequados a estudos mais detalhados.

Tabela 1 — Relação de algumas fontes termais com teores de sílica, temperatura e radioatividade.

LOCAL	FONTE	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TEOR SiO ₂ (ppm)	TEMPERATURA CALCULADA T _{SiO₂} (°C)	RADIOATIVIDADE (x 10 ⁻⁹ Curie/l)
Rio Grande do Sul					
Iraí	F.A.	35,5 (11)*	16,4 (11)	56,4	4,56 (11)
	F.B.	27,2 (11)	16,4 (11)	56,4	
	F.E.	24,5 (11)	14,0 (11)	50,8	
Santa Catarina					
Caldas da Imperatriz		40,0 (11)	30,84 (11)	80,7	5,68 (11) 14,56 (14)
Paraná					
Guarapuava	Santa Clara	29,0 (6,11)	27,1 (6)	75,4	5,82 (6, 11)
	Jacu	29,0 (6, 11)	34,3 (6)	85,2	3,09 (6,11)
	Boa Vista	31,5 (6)	31,2 (6)	81,2	5,71 (6) 5,25 (6)
	Nossa Sra. de Lourdes	30,0 (6)	56,9 (6)	108,0	1,97 (11) 2,61 (11)
	Candói	30,5 (6)	41,5 (6)	93,4	1,90 (6) 2,66 (6) 2,61 (11)
Campo Largo	Água Ouro Fino		10,0 (11)	39,6	0,53 (11)
São Paulo					
Itapira	Água Boa Vista	26,0 (6,13)	25,72 (13)	73,3	8,91 (6)
	Água Palmital	22,6 (13)	61,4 (13)	111,4	0,99 (13)
Águas da Prata	Antonio Villela	19,5 (19)	7,0 (19)	28,4	32,54 (19)
		21,0 (3)	8,1 (3)	32,9	
	Antiga	21,6 (11, 13)	42,0 (6,10)	94,0	4,82 (6,10,11)
		22,0 (19)	33,6 (19)	84,3	10,9 (14)
		24,0 (19)	44,8 (19)	96,9	6,73 (19) 4,77 (19)
	Paíol	22,0 (19)	28,4 (19)	77,3	1,29 (19)
			30,2 (6,13)	79,9	
		24,0 (3)	30,0 (3)	79,6	
		24,0 (3)	36,0 (3)	87,3	
	Platina	23,9 (13,11)	46,0 (13)	98,1	4,22 (13,11,6)
	(ou Chapadão)	24,0 (19)	36,7 (19)	88,1	2,44 (10,19)
			21,21 (6)	65,9	
		24,0 (3)	30,0 (3)	79,6	
	Cascatinha	21,0 (19)	10,2 (19)	40,2	3,58 (19)
	(ou Deliciosa)	21,0 (3)	32,0 (3)	82,3	
	F.da Bandeira	21,0 (19)	32,1 (19)	82,4	6,34 (19)
	Nova	21,0 (19)	28,1 (19)	76,9	7,67 (19) 8,2 (10,14)
	Nascente	23,0 (3)	15,0 (3)	53,2	
	Vitória	21,0 (3)	25,0 (3)	72,3	
	Bica do Padre	20,0 (3)	20,0 (3)	63,7	
	Bica do Boi	21,0 (3)	16,6 (3)	56,8	
	Bica Quinta do Paíol	20,0 (3)	24,0 (3)	70,7	

cont. Tabela 1

LOCAL	FONTE	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TEOR SiO ₂ (ppm)	TEMPERATURA CALCULADA T _{SiO₂} (°C)	RADIOATIVIDADE (x 10 ⁻⁹ Curie/l)
São Pedro	Almeida Sales	27,0 (11,19)	10,4 (19)	40,8	0,07 (11,19)
		22,0 (3)	13,6 (3)	49,8	
	Juventude	30,0 (19)	9,6 (19)	38,3	0,12 (11,19)
		21,0 (3)	21,0 (3)	65,5	
	Gioconda	30,2 (11)			
		32,2 (19)	13,6 (19)	49,8	4,44 (11,19)
21,0 (3)		22,0 (3)	67,3	4,3 (14)	
Valinhos	Águas de São Pedro	32,3 (11)			4,48 (11)
		30,0 (6)	22,56 (6)	68,3	34,03 (6)
	Sonia	21,2 (19)	37,4 (19)	88,9	3,6 (14,19)
	21,0 (11,19)	36,0 (11,19)	87,3	4,0 (19,11,6)	
Amparo	Bocaina	21,0 (19)	48,9 (19)	100,9	2,4 (19)
		20,0 (3)	13,6 (3)	49,8	
	Salles Teixeira	21,0 (19)	43,7 (19)	95,8	3,0 (19)
		Jacob	20,0 (19)	24,4 (19)	71,3
	N.S. do Amparo	22,0 (3)	30,0 (3)	79,6	4,3 (14)
		22,0 (19)	30,8 (19)	80,7	3,6 (19)
22,0 (3)		50,0 (3)	101,9	3,7 (14)	
21,0 (19)		38,9 (19)	90,6	3,4 (10)	
Monte Alegre Socorro	Santa Maria	20,0 (19)	45,1 (19)	97,2	2,4 (10,19)
	Pompéia I	20,0 (3)	8,7 (3)	35,1	
	Pompéia II	20,0 (3)	7,6 (3)	31,0	4,4 (14)
	Santo Antonio	18,0 (19)	28,5 (19)	77,5	10,7 (14)
Serra Negra	São João	19,4 (19)	33,9 (19)	84,7	7,1 (19)
					2,1 (14)
	N.S. Rosário	19,5 (19)	26,3 (19)	74,3	3,2 (19)
	São Carlos	20,0 (19)	32,7 (19)	83,2	1,9 (19)
	São Roque	28,2 (19)	21,6 (19)	66,6	3,7 (14)
Águas de Lindóia	Filomena	28,0 (13)			4,2 (19)
		27,2 (13)			
	27,0 (3)	18,5 (3)	60,8		
Lindóia	São Benedito	21,0 (11,7)	47,1 (7)	99,2	5,8 (14)
	Lindóia	28,0 (11,6)	21,77 (6)	66,9	6,3 (14)
	Sta. Terezinha	21,5 (7)	46,4 (7)	98,4	5,4 (14)
Campos do Jordão	Marisa	18,0 (19)	20,1 (19)	63,9	2,37 (19)
	Água Santa	18,0 (19)	17,7 (19)	59,2	3,7 (14)
Pedregulho	Bom Jardim	28,8 (19)	21,5 (17)	66,4	1,08 (19)
Guaref	Monte Cristo	19,2 (19)	45,1 (19)	97,2	0,12 (19)
	Oswaldo Cruz	17,0 (19)	41,0 (19)	92,9	0,61 (19)
	S. Martinho	20,0 (19)	43,4 (19)	95,4	0,56 (19)
Porangaba Ibirá	Carlos Gomes	24,0 (3)	38,0 (3)	89,6	0,08 (19)
	Magna	22,0 (19)	45,6 (19)	97,8	1,13 (19)
	Seixas	24,0 (3)	42,8 (3)	94,8	
	Ibirá	24,5 (3)	29,0 (3)	78,2	
Boa Esperança	Poço Profundo	24,0 (3)	47,0 (3)	99,1	
	Água Java	22,0 (6,13)	35,2 (6)	86,3	2,01 (6,13)
			52,0 (13)	103,7	
Itapetininga	Água Excelsior		59,9 (13)	110,5	

cont. Tabela 1

LOCAL	FONTE	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TEOR SiO ₂ (ppm)	TEMPERATURA CALCULADA T _{SiO₂} (°C)	RADIOATIVIDADE (x 10 ⁻⁹ Curie/l)
Águas Virtuosas de Santa Rosa	F. I	18,0 (11)	37,6 (11)	89,1	4,4 (14)
	F. II	18,0 (11)	37,6 (11)	89,1	4,57 (11)
	F. III	18,5 (11)	40,0 (11)	91,8	2,77 (11)
	F. IV	18,5 (11)	40,0 (11)	92,2	2,38 (11)
Pederneiras	Água Quilombo	29,0 (6)	28,9 (6)	78,1	
Rio de Janeiro					
Rio de Janeiro	Água Federal	24,0 (6)	48,0 (6)	100,0	
	Atlântida		59,0 (11)	109,8	
	Água Santa Cruz		27,5 (11)	76,1	1,56 (11)
	Água Meyer		105,0 (11)	139,8	
	Silva Manuel		58,0 (11)	108,9	
Niterói	Ingá	20,0 (6)	94,0 (6)	133,7	
Minas Gerais					
Araxá	F. 1	29,9 (6,17)	19,6 (6,17)	62,9	10,34 (6,17) 10,19 (11)
	F. 2	26,0 (6,17)	27,8 (6,17)	76,4	1,75 (6,11,17)
	F. 3	25,5 (6,17)	21,8 (6,17)	66,9	6,37 (6,11,17)
	F. 4	31,2 (6,17)	22,5 (6,17)	68,2	1,57 (6,11,17)
	F. 5	30,6 (6,17)	23,8 (6,17)	70,3	5,79 (6,11,17)
	F. 6	28,1 (6,17)	22,4 (6,17)	68,0	15,18 (6,11,17)
Cambuquira	Andrade Júnior	34,1 (6,17)	24,2 (6)	71,0	4,99 (6)
	Regina Werneck	21,4 (6)	10,9 (6)	42,4	0,29 (6)
	Com. Augusto Ferreira	21,3 (6)	101,3 (6)	137,9	0,73 (6,11)
	Fernandes Pinheiro	21,2 (6)	58,7 (6)	109,5	4,33 (6) 0,58 (11) 4,2 (14) 61,15 (14)
	Souza Lima	21,1 (6)	23,9 (6)	70,4	0,58 (6) 4,33 (11)
	Marimbeiro I	20,0 (6)	75,68 (6)	122,2	0,76 (6) 1,64 (7)
	Marimbeiro II	19,9 (6)	77,75 (6)	123,6	0,69 (6) 1,35 (7)
	Marimbeiro III	19,8 (6)	92,43 (6)	132,8	0,55 - 0,62 (6)
Lambari	Paulina F. 4	20,4 (6,17)	19,93 (6,17)	63,5	1,02 (6,11,17)
	Maria F. 5	20,2 (6,17)	19,75 (6,17)	63,2	0,84 (6,17)
Poços de Caldas	Macacos	39,0 (6) 41,7 (11,17) 40,0 (14)	27,8 (6)	76,4	0,80 (6,11,17,14)
	15 de Novembro	26,0 (6,11) 28,8 (14) 26,0 (17)	28,0 (6)	76,8	1,6 (6,11,17) 2,29 (14)
	Pedro Botelho	42,4 (6,11)	29,1 (6,11)	78,4	0,47 (6,11)
Pocinhos	F. Rio Verde e F. Samaritana	24,1 (6,11,17)	23,0 (6,11,17)	69,0	7,9 (6,11,17) 18,7 10,4 (14)
Rio Pardo	Água do Rio Pardo	39,0 - 40,0 (6)	21,8 (6)	66,9	
Patrocínio	Água do Salitre	20,3 (6)	48,8 (6)	100,8	2,04 (6,11)

cont. Tabela 1

LOCAL	FONTE	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TEOR SiO ₂ (ppm)	TEMPERATURA CALCULADA T _{SiO₂} (°C)	RADIOATIVIDADE (x 10 ⁻⁹ Curie/l)
São Lourenço	Água da Serra Negra	23,5 (6)	12,20 (6)	46,1	0,47 (6)
São Lourenço	F. 1 Oriente	18,9 (6,17)	14,2 (6,17)	51,3	1,75 (6,11,17)
	F. 2 Andrade Figueira	17,8 (6,17)	9,4 (6,17)	37,6	0,72 (6)
					0,20 (11)
	F. 3 Vichy	17,5 (6,17)	38,87 (6,17)	90,6	0,47 (6,11,17)
	F. 4	18,4 (6,17)	38,54 (6,17)	90,2	0,33 (6,17)
São Sebastião do Paraíso	Água S. Sebastião do Paraíso	30,6 (6)	18,54 (6,17)	60,9	54,48 (6)
					10,86 (6)
					4,91 (6)
Goiás					
Caldas Novas	28 Fontes	45,0 (6)	6,0 (9)	23,9	0,11 (6)
		40,5 (9)			
		40,0 - 42,0 (6)			
Lagoa de Pirapetinga		43,5 (9)	30,0 (9)	79,6	6,55 (9)
		51,0 (6)			0,12 (9)
		42,0 - 51,0 (11)			
Caldas Velhas		27,0 (9)	7,8 (9)	31,7	0,11 (9)
		37,0 - 40,0 (6)			
Mato Grosso					
Cuiabá	Fontes Palmeiras	38,0 - 41,0 (15)	28,4 (12)	77,4	
	Fontes Termais do Pouro	27,0 (12)	29,0 (6)	78,2	
General Carneiro	11 Fontes	36,0 - 46,5 (16)	20,2 - 21,2 (16)	64,1 - 65,9	
Bahia					
Itapicurú	Caldas de Cipó	40,0 - 37,0 (6)	19,2 (6)	62,1	5,1 (6)
		37,0 (13)			5,6 (13,17)
	Muriçoca	34,6 (6,13)	20,2 (6)	64,1	1,85 (6)
					2,04 (13)
	Mosquete	35,5 (6,13)	14,19 (6)	51,3	1,25 (6)
					1,70 (13)
	Fervente	31,0 (6,13)	12,4 (6)	46,7	1,70 (13)
Pernambuco					
Brejo da Madre de Deus	4 Fontes	29,0 - 30,0 (6)	81,26 (6)	125,9	3,69 (13)
					1,80 (13)
Paraíba					
Brejo das Freiras	3 Fontes	35,6 - 36,0 (6)	52,7 (6)	104,38	1,80 (13)
					3,37 - 3,69 (13)
Sergipe					
Água Salgado	Água Salgado	29,0 (6)	29,9 (6)	79,5	0,25 (6)

* Os números em parênteses indicam as referências.

Tabela 2 — Resultados das Análises de Sílica das Fontes e Cálculos de Temperatura

LOCAL	NOME DA FONTE	TEOR DE SÍLICA (mg/l)	TEMPERATURA CALCULADA (° C)
São Paulo	Água Superficial	5,0	18,4
Valinhos	Mércia	31,2	81,2
	Antonio Figueira	27,8	76,5
Águas de São Pedro	Juventude	15,7	54,7
	Gioconda	13,7	49,9
	Almeida Sales	13,2	48,7
	Nascente — 4	9,4	37,4
Cornélio Procópio (PR)	Poço Iguaçú	36,8	88,2
Santa Catarina	Guarda de Sta. Catarina	28,8	77,9
	da Guarda	29,5	78,9
	Guarda de Cubatão	34,8	85,8
	Caldas de Imperatriz	30,7	80,5
	Gravatal	33,1	83,6

RADIOATIVIDADE DE ÁGUAS TERMAIS

Na última coluna da Tabela 1 são fornecidos valores de radioatividade medidos nas águas das fontes, em unidades de 10^{-9} Curies. Esta radioatividade é devida principalmente ao transporte de radônio pelas águas. A quantidade de radônio disponível depende da abundância de urânio nas diversas rochas, sua variação com a profundidade e dos diversos mecanismos de migração do radônio para as áreas de circulação. Se estes valores podem ser considerados constantes, a radioatividade das fontes originadas próximo à superfície será maior pelo curto tempo de percurso das águas. As fontes com origem em profundidades maiores, alcançam a superfície após longo tempo de percurso e têm portanto radioatividade menor. As temperaturas medidas na superfície não serão afetadas significativamente, se as fontes possuem vazões expressivas ($> 20 \text{ m}^3/\text{h}$). Assim, em alguns sistemas de fontes termais é constatada uma correlação negativa entre temperatura e radioatividade.

Como exemplo mostramos na Fig. 3 os dados referentes a fontes termais em Poços de Caldas. Parece que neste caso a correlação entre o logaritmo da radioatividade e a temperatura da fonte é linear e negativa. Se esta relação realmente for válida, a velocidade do fluxo

ascendente de água pode ser calculada, usando a seguinte relação linear:

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{\lambda (T - T_0)}{v \cdot g} \quad (4)$$

onde: I é a radioatividade da fonte com temperatura T ,
 I_0 é a radioatividade da fonte com temperatura T_0 ,
 λ é a constante de decaimento do radônio,
 v é a velocidade do fluxo ascendente de água e
 g é o gradiente geotérmico da região.

Para $g = 30^\circ\text{C}/\text{km}$ (Araújo, 1978), a velocidade do fluxo ascendente das fontes de Poços de Caldas, calculados a partir do declive da reta da Fig. 3 é de 19 m/dia.

No caso da correlação entre temperatura e radioatividade ser linear e positiva a interpretação se torna mais complexa. Esta correlação pode ser devida à mistura das águas com outras superficiais ou à variação na distribuição vertical de urânio na crosta. Portanto, estudos detalhados da radioatividade das fontes termais podem fornecer informações relevantes sobre a distribuição vertical do calor radiogênico na crosta superior.

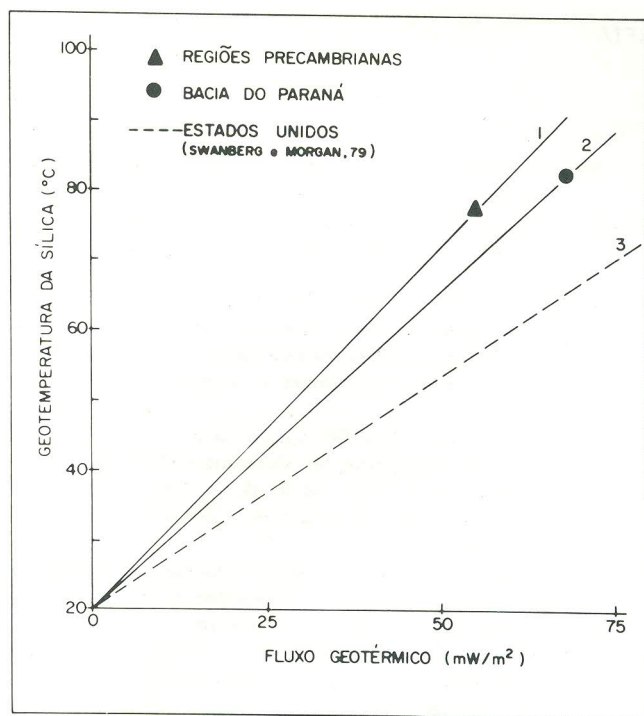


Figura 2 — Relação entre geotemperatura de sílica e fluxo geotérmico sendo que:
 1. Dobramentos Brasileiros.
 2. Bacia do Paraná.
 3. Estados Unidos (Swanberg e Morgan, 1978).

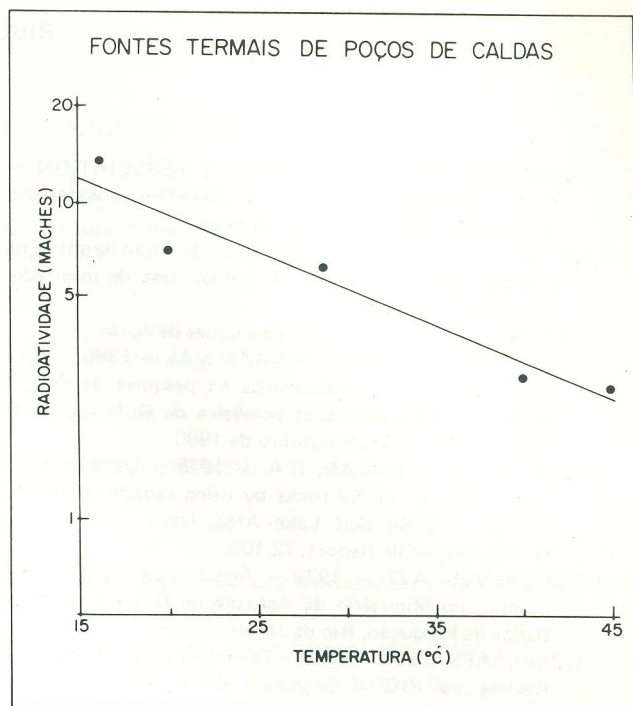


Figura 3 — Relação entre radioatividade e temperatura referente às fontes termais de Poços de Caldas — MG.

Tabela 3 — Valores médios para fontes localizadas na Bacia do Paraná e Dobramentos Brasileiros.

Região	Geotemperatura da sílica (°C)	Fluxo Geotérmico q (mW/m ²)	Condutividade térmica (W/m°C)
Bacia do Paraná	82.6	68	2.1
Dobramentos Brasileiros	77.6	55	3.0

CONCLUSÕES

Apesar dos dados serem insuficientes, devido principalmente à falta de informações adequadas na bibliografia, este trabalho indica certas características gerais de fontes termais, o que contribui no sentido de dirigir as pesquisas nesta área.

Da distribuição geográfica das fontes nota-se que as áreas cratônicas estão praticamente livres de fontes termais. Estas se encontram ao redor de áreas cratônicas, na faixa de dobramentos Brasileiros. Um dado importante que pode ser estimado com base no geotermômetro de sílica, é a profundidade de circulação de águas termais, a partir de valores conhecidos de condutividade térmica média e do fluxo geotérmico do local.

A velocidade de ascensão das águas da fonte pode ser calculada com base em dados de radioatividade, tem-

peratura da fonte e gradiente geotérmico da região, quando existir uma relação linear, negativa entre o logaritmo de radioatividade e a temperatura da fonte.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Proc. n. 40.2735/79) para as viagens de campo e coleta de amostras.

As análises de sílica foram efetuadas no laboratório do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Área de Processos Especiais).

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa concedida (Proc. n. 80/1728-2) ao primeiro autor (S.J. Hurter).

BIBLIOGRAFIA

1. AMERICAN PUBLICATION HEALTH ASSOCIATION — 1976 — Standard methods for examination of water and wastewater. Washington, DC 14 th ed.
2. ARAÚJO, R.L.C. — 1978 — Pesquisa de fluxo térmico na chaminé alcalina de Poços de Caldas, tese de mestrado, IAG-USP, pp. 1-120.
3. CETESB — 1977/78 — Boletins de exames de águas.
4. COSTA, I.M., IYER, S.S.S.; HAMZA, V.M. — 1980 — Aplicação de métodos geoquímicos na pesquisa da energia geotermal. XXI Congresso Brasileiro de Química, Porto Alegre — RS, 26-31 de outubro de 1980.
5. FELMLEE, K., CADIGAN, R.A. — 1978 — Determination of uranium in source rocks by using radium in Crystal Springs — Great Salt Lake Area, Utah — U.S. Geol. Survey, Open-File Report: 72-108.
6. GONÇALVES, A.D. — 1932 — Águas minerais do Brasil. Boletim do Ministério da Agricultura, Diretoria de Estatística da Produção, Rio de Janeiro — RJ.
7. GUIMARÃES, J.E.P. — 1946 — Fontes da cidade de Lindóia. Revista do IGG — Secretaria da Agricultura, 4 (4) : 383-405.
8. HAMZA, V.M. — 1978 — Aspectos geofísicos das águas termais no Brasil. IV Congresso Latino-Americano de Termalismo. Águas de São Pedro — SP.
9. LOBO, J.B. — 1938 — Águas termais em Goiás. Revista de Mineração e Metalurgia, 3 (15): 137-146.
10. LONGO, O.W. — 1967 — Águas radioativas do Estado de São Paulo. Revista do IGG. Secretaria da Agricultura, 19: 27-54.
11. LOPES, R.G.S. — 1966 — Águas minerais do Brasil. Boletim n. 2 da Comissão Permanente de Crenologia — Secretaria da Agricultura. São Paulo — SP.
12. MAGALHÃES, A.A.B. — 1941 — Pelos sertões do Brasil. Biblioteca Pedagógica Brasileira, 195: 341-371.
13. MATOS, F.B. — 1928 — Estações climatéricas de São Paulo. Publicação da Secretaria da Agricultura de São Paulo — SP.
14. MOURÃO, B.M. — 1976 — Temas de crenologia. Trabalhos apresentados no Primeiro Seminário Brasileiro de Termalismo. Poços de Caldas, abril de 1975, Sociedade Brasileira de Termalismo, Hidrominas e Conselho Municipal de Turismo.
15. OLIVATTI, O.; MARQUES, V.J. — 1973 — Relatório Final do Projeto Águas Quentes. Convênio CPRM-CODEMAT.
16. RAZA, S.N.; OLIVEIRA, M.M. de — 1980 — Relatório Final do Projeto Águas Quentes. Convênio METAMAT-CODEMAT.
17. REZENDE, P. — 1920 — Águas minerais do Estado de Minas Gerais. Imprimerie de Vaugirard, H. — L. Motti, Directeur, 12-13, Impasse Ronsin Paris.
18. SWANBERG, C.A.; MORGAN, P. — 1978 — The linear relation between temperature based on the silica content of ground water and regional heat flow: A new heat flow map of the United States. Pure and Applied Geophysics, 117: 227-241.
19. TEIXEIRA, A.S. — 1946 — Fontes hidrominerais do Estado de São Paulo. Publicação da Diretoria Geral do Departamento de Saúde de São Paulo, ano XI, n. 28: 137-354.
20. TRUESDELL, A.H. — 1976 — Summary of section III, Geochemical techniques in exploration, in Proc. 2nd U.N. Symp. on the development and use of geothermal resources, San Francisco — 1975 — 1: 53-79.

Recebido em Janeiro de 1981.