



Mapeamento de Gradientes Geotérmicos no Estado de São Paulo

Antonio Jorge de Lima Gomes (ajlgomes@on.br) e Valiya M. Hamza (hamza@on.br), Observatório Nacional, RJ, Brasil.

Copyright 2004, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.

Resumo

Resultados de estudos geotérmicos realizados desde a década de 1970, foram utilizados numa avaliação detalhada dos gradientes geotérmicos do Estado de São Paulo. A compilação atual engloba medidas experimentais em 83 localidades (distribuídas em 43 municípios). Grande parte do Estado de São Paulo apresentou gradientes térmicos na faixa de 20 a 30°C/km, com valor médio de 20,3 ± 0,81°C/km. Esta faixa é típica de áreas continentais, tectonicamente estáveis. Contudo, foram encontradas áreas com gradientes térmicos acima de 35°C/km ao longo da borda norte, na parte central da bacia Taubaté, em Paranapanema na região sudeste e em Presidente Prudente na região oeste.

Introdução

Os primeiros estudos geotérmicos no Estado de São Paulo foram efetuados na década de 1970, por Meister (1973), Vitorello et al (1978) e Hamza et al, (1978). Posteriormente, nas décadas de 1980 e 1990, foram efetuados novos levantamentos na região oeste (Santos et al, 1986), na bacia Taubaté (Hamza et al, 1986; Ribeiro, 1987), na área costeira de São Sebastião (Hamza et al, 1992) e na parte leste do estado (Del Rey e Hamza, 1989; Higashi e Hamza, 1996; Higashi, 1999). Grande parte desses dados encontra-se disperso em publicações de circulação limitada. Nas avaliações posteriores dos dados geotérmicos (Hamza and Muñoz, 1996 e Hamza and Silva Dias, 2001), foram examinados apenas aspectos do campo térmico em escalas continentais. Apresentam-se, neste contexto, resultados da primeira análise detalhada da distribuição do gradiente geotérmico no Estado de São Paulo.

O presente estudo faz parte integrante de um projeto de pesquisa iniciada recentemente no Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional – ON/MCT, cujo objetivo é a avaliação de recursos geotérmicos da Bacia do Paraná. Na primeira fase deste projeto foi efetuada uma compilação dos dados de perfis térmicos de 83 localidades, distribuídos em 43 municípios no Estado de São Paulo. A distribuição geográfica desses dados é ilustrada na figura (1). Com exceção das áreas na região sudeste e noroeste a distribuição de dados é razoavelmente uniforme, o que permite análise do campo térmico em escalas regionais.

Metodologia Adotada

No presente trabalho foi efetuado uma reavaliação dos gradientes térmicos determinados nos estudos anteriores, com objetivo de uniformizar os procedimentos

de análise de dados primários e de padronizar os métodos de correção. A fim de minimizar problemas oriundos de mudanças na qualidade dos dados primários foram selecionados apenas dados de medições experimentais que permitem determinação direta do gradiente geotérmico. Desta forma, foram utilizados resultados obtidos pelos métodos designados de convencional (CVL), temperatura estável do fundo de poço (CBT) e temperatura do fundo de poço de petróleo (BHT). De acordo com a escala de prioridades sugeridas por Hamza e Muñoz (1996), resultados destes métodos podem ser considerados como de qualidade superior àqueles obtidos por métodos geoquímicos.

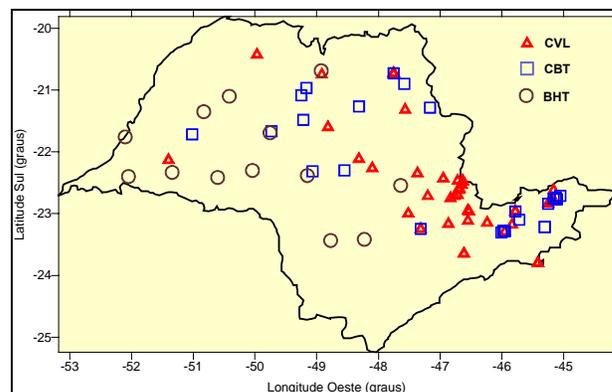


Figura 1 – Locais das medidas geotérmicas no Estado de São Paulo por tipo de Gradiente.

No método convencional (CVL) o gradiente geotérmico é determinado para intervalos de profundidades selecionados, com base em informações de perfil litológico do poço em questão. Os valores foram calculados pelo critério de mínimos quadrados. Nota-se, neste contexto, que para uma matriz de coeficientes $A_{M \times N}$, com $M > N$, e para um vetor \bar{y} de dados observados o critério de mínimos quadrados fornece estimativas (\hat{x} e \hat{y}) que satisfaz o modelo:

$$\hat{y} = A \hat{x} = A(A^T A)^{-1} A^T \bar{y} \quad (1)$$

Nos casos de poços rasos com indícios de perturbações térmicas foram aplicadas correções para minimizar os efeitos de mudanças climáticas e de topografia local.

O método de temperatura estável do fundo do poço (CBT) foi utilizado em casos em que o campo térmico do poço é alterado pelo fluxo de fluidos no seu interior. Nesses casos a perturbação térmica é praticamente nula na parte inferior do poço.

O método de temperatura de fundo de poço (BHT) foi adotado para determinação de gradientes térmicos em poços de petróleo. Em ambos os casos a relação utilizada para a determinação do gradiente térmico é:

$$\Gamma = (T_{FP} - T_0) / H = \sum_{i=1}^N (dT / dz)_i h_i / \sum h_i \quad (2)$$

onde T_{FP} é a temperatura do fundo do poço, T_0 a temperatura média anual da superfície, H a profundidade do poço, N o número de camadas e h a espessura da camada. A segunda igualdade no lado direito da equação (1), indica, que os gradientes calculados pelo método CBT e BHT, são médias ponderadas de gradientes intervalares, os quais mudam conforme as variações nas condutividades térmicas das camadas interceptadas pelo poço. Convém notar que, no método CBT, as medições de temperaturas são geralmente efetuadas em poços de regimes térmicos estáveis, utilizando termômetros de precisão e, portanto, não necessitam de correções. Por outro lado, o grau de incerteza deste método é maior, já que falta de informações apropriadas dificultam a determinação exata da temperatura média anual da superfície nos locais de poços. As medições das temperaturas BHT, efetuadas em poços de petróleo, precisam ser corrigidas dos efeitos perturbadores das atividades de perfuração. No presente trabalho, os dados BHT com medidas múltiplas de temperaturas, foram corrigidos pelos métodos propostos por Lachenbruch e Brewer (1959) e Middleton (1980). Nos casos em que havia apenas uma medida de temperatura utilizou-se a relação empírica conhecida como correção 'AAPG' (AAPG, 1976). A incerteza neste método é oriunda principalmente de uso de termômetros com baixa exatidão para as medidas.

Resultados Obtidos

No estagio atual do projeto foram concluídos reavaliações de gradientes térmicos em 83 localidades, distribuídos em 43 municípios, do Estado de São Paulo. A faixa de valores encontrados é de 10 a 30°C/km, sendo que o valor médio é $20,3 \pm 0,81$ °C/km.

Apresenta-se na Tabela (1) gradientes térmicos obtidos, em 45 localidades, pelo método convencional (CVL), descrito no item anterior. Na ausência de evidências independentes a ocorrência de valores elevados em Cosmópolis, Nuporanga e Presidente Prudente não foram considerados como representativos de gradiente térmicos regionais. Os desvios padrões na determinação dos gradientes, apresentados na última coluna desta tabela indicam os graus de incerteza deste método.

Resultados de gradientes térmicos obtidos em 25 localidades pelo método CBT, acima descrito, são apresentados na Tabela (2). Com exceção do valor alto de 52°C/km encontrado num poço de 500 metros de profundidade em Taubaté (Vale do Paraíba), os gradientes encontrados estão na faixa de 12 a 33°C/km. Esta faixa mais ampla e valores relativamente elevados de desvio padrão são indicativos de maior grau de incerteza inerente deste método. As profundidades dos poços onde foram efetuados perfisagens térmicas pelo método convencional e pelo método CBT são inferiores a mil metros.

Encontra-se agrupados na Tabela (3) os gradientes térmicos calculados para treze locais de poços de petróleo, obtido pelo método BHT. Com a exceção do valor encontrado em poço de Pitanga, os gradientes térmicos estão numa faixa relativamente estreita de 17 a

23°C/km. As profundidades dos poços de petróleo variam de 1000 a 5000 metros.

Tabela 1 – Valores do Gradiente pelo método convencional (CVL).

Município	Coordenadas		Grad. (°C / km)	
	Latitude	Longitude	Calculado	σ
Águas de Lindoia	22° 29'	46° 38'	17,5	0,21
	22° 28'	46° 38'	17,3	0,97
Amparo	22° 43'	46° 46'	18,1	0,13
Araras	22° 21'	47° 22'	19,2	0,51
Atibaia	23° 07'	46° 33'	13,5	0,11
Brag. Paulista	22° 57'	46° 33'	21,9	0,16
	22° 58'	46° 32'	24,2	0,21
Brotas	22° 16'	48° 06'	11,5	1,67
Cosmópolis	22° 43'	47° 12'	39,7	0,65
Dourados	22° 07'	48° 19'	19,6	0,65
Guaratingetá	22°46' 54"	45° 10'	16,1	1,31
	22°48' 06"	45°10' 26"	16,1	2,82
	22°47' 47"	45°13' 24"	27,1	0,71
Itapira	22° 28'	46° 43'	15,8	0,14
Itápolis	21° 36'	48° 49'	15,0	1,68
Itú	23° 15'	47° 19'	19,9	0,03
Jacareí	23°17' 44"	45°57' 20"	23,2	0,05
Jundiaí	23° 10'	46° 52'	19,8	0,09
Lindóia	22° 32'	46° 39'	11,5	0,14
Mogi Mirim	22° 26'	46° 57'	13,8	0,48
Monte Al. do Sul	22° 42'	46° 43'	20,7	0,11
Nuporanga	20°43' 49"	47°45'15"	34,9	1,31
	20°43'49"	47°45'15"	20,2	1,03
	20°43'49"	47°45'15"	31,8	0,27
	20°43'49"	47°45'15"	13,1	0,28
Olímpia	20° 45'	48° 55'	22,1	0,14
Pedreira	22° 45'	46° 50'	9,8	0,15
Piquete	22°37' 15"	45°09' 46"	8,9	0,13
Pres. Prudente	22° 08'	51° 24'	36,8	0,76
Rafard	23° 00'	47° 31'	21,1	0,37
Santa Izabel	23° 08' 51"	46°14' 22"	15,2	3,65
S. J. Campos	22° 58'	45° 47'	29,3	4,63
	22° 58'	45° 47'	26,0	0,60
	23° 10' 49"	45°50' 09"	27,4	2,84
São Paulo	23° 39'	46° 37'	22,0	0,26
	23° 39'	46° 37'	25,0	0,66
São Sebastião	23° 48'	45° 25'	16,4	0,26
	24° 48'	46° 25'	16,9	0,25
	25° 48'	47° 25'	20,8	2,32
Serra Azul	21° 19'	47° 34'	19,0	2,31
Serra Negra	22° 36'	46° 42'	22,8	0,14
	22° 37'	46° 42'	21,5	0,26
	22° 36'	46° 41'	20,5	0,19
Votuporanga	20° 25'	49° 58'	28,8	0,63

Mapas de Gradiente Geotérmico

A elaboração de mapas em escalas apropriadas é muitas vezes a melhor forma de examinar as variações regionais do gradiente geotérmico. No presente caso, optou-se pelos mapas de contorno automáticos gerados por softwares computacionais. O mapeamento do gradiente foi realizado através do método de superfícies numéricas cujos resultados constam no mapa da Figura (2). O mapa revela que a grande parte do Estado de São Paulo é

caracterizada por gradientes térmicos na faixa de 15 a 25°C/km. Contudo, há indícios de que os gradientes térmicos são relativamente elevados na região norte. Por outro lado, a faixa Pré Cambriana na região oeste parece ser caracterizada por valores de gradientes térmicos menores que 20°C/km. As feições indicadas na parte sudeste do estado não são confiáveis por falta de dados apropriados.

Tabela 2 - Valores do Gradiente do método de temperatura estável do fundo do poço (CBT).

Município	Coordenadas		Gradiente (°C/km)	
	Latitude	Longitude	Média	σ
Batatais	20° 54'	47° 35'	12,5	0,96
Baúru	22° 19'	49° 04'	16,3	0,78
Caçapava	23° 06'	45° 43'	25,2	2,72
C. Coqueiros	21° 17'	47° 10'	20,3	1,79
Guaratingetá	22° 45' 38"	45° 09' 41"	22,9	3,27
Ibirá	21° 05'	49° 15'	13,0	3,57
Itú	23° 15'	47° 19'	21,4	1,79
Jaboticabal	21° 16'	48° 19'	16,5	1,25
Jacareí	23° 16' 53"	45° 58' 33"	20,7	4,17
	23° 18' 15"	46° 00' 33"	17,4	2,98
	23° 17'	45° 57'	18,6	5,43
Jaú	22° 18'	48° 33'	17,4	2,98
Lins	21° 40'	49° 44'	32,9	0,63
Lorena	22° 44' 34"	45° 07' 34"	29,0	0,74
	22° 42' 47"	45° 03' 14"	19,5	2,00
	22° 46' 09"	45° 06' 35"	27,0	1,17
Lucélia	21° 43'	51° 01'	16,0	1,56
Novo Horizonte	21° 29'	49° 13'	24,4	0,58
Nuporanga	20° 43' 49"	47° 45' 15"	25,6	1,22
	20° 43' 49"	47° 45' 15"	21,1	1,85
S.J. Campos	22° 58'	45° 47'	21,1	2,84
	22° 50' 28"	45° 15' 02"	22,1	1,51
S. L. Paraitinga	23° 13' 02"	45° 18' 32"	14,9	2,87
	23° 13' 02"	45° 18' 32"	13,2	2,04
Taubaté	23° 01' 35"	45° 33' 19"	52	--
Uchoa	20° 58'	49° 10'	22,6	1,30

Tabela 3 – Valores do Gradiente térmico pelo método de temperatura do fundo do poço (BHT).

Local	Long Decimal	Lat Decimal	Gradient e
Amadeu Amaral	-50,0417	-22,3022	21,7
Aracatuba	-50,4158	-21,1000	19,9
Cuiabá Paulista	-52,0486	-22,4000	21,9
Guareí (GU-3-SP)	-48,2292	-23,4167	19,1
Lagoa Azul	-50,8300	-21,3500	20,1
Lins	-49,7561	-21,6922	17,4
Olimpia	-48,9278	-20,6875	21,7
Paraguaçu Paulista	-50,6047	-22,4153	17,1
Paranapanema	-48,7744	-23,4353	22,9
Piratininga	-49,1522	-22,3839	19,0
Pitanga	-47,6403	-22,5444	36,9
Presidente Epitácio	-52,1019	-21,7583	22,3
Taciba	-51,3414	-22,3333	19,0

Correlação Geológica

Há indícios de que a distribuição do gradiente geotérmico é de certa forma influenciada pelas características

geológicas. A fim de examinar a possível existência de correlações desta natureza foram agrupados os dados conforme as características litoestratigráficas locais. Os resultados apresentados na Tabela (4) indicam aumentos sistemáticos de gradientes térmicos com a idade geológica, de forma semelhante a aquela sugerida por Hamza e Verma (1969). O mapa da Figura (3) ilustra esta correlação, realçando o aumento sistemático do gradiente geotérmico em direção ao centro da Bacia do Paraná.

Tabela 4 – Gradientes por idade geológica e formação.

Caracterização Geológica	Unidades Estratigráficas	Gradiente (°C/km)	
		Médio	σ
Complexos Arqueanos			
Complexos	Juiz de Fora	16	4
	Varginha	18	3
	Costeiro	20	4
	Média	18	
Complexos e Grupos Proterozóicos			
Inferior	Comp. Amparo	20	4
	Comp. Par.do Sul	22	3
	C. Turvo Cajati	21	3
	Formação Setuva	22	4
Médio	Grupo Canastra	26	4
	Grupo São Roque	18	4
	Comp. Pilar do Sul	20	4
Superior	Complexo Embú	22	5
	Média	21	
Bacia do Paraná			
Devoniano	Grupo Paraná	20	4
Carbonífero	Grupo Tubarão	22	5
Jurrásico	Grupo São Bento	20	6
Permiano	Grupo Passa Dois	20	6
Cretáceo	Grupo Baurú	30	6
	Média	22	
Coberturas Cenozóicas			
Bacias	São Paulo	20	4
	Taubaté	36	12
	Média	28	

Conclusões

A reavaliação de dados geotérmicos atuais do Estado de São Paulo revela que o regime térmico é estacionário e caracterizado por gradientes térmicos na faixa de 20 a 30°C/km.

Os valores médios do gradiente do Estado de São Paulo obtidos pelo método CVL foram de $20,3 \pm 0,81$ °C/km, pelo método CBT de $20,5 \pm 2,08$ °C/km e método BHT de $21,5 \pm 1,50$ °C/km.

Há indícios de existência de uma correlação entre os gradientes térmicos e as características litoestratigráficas das unidades geológicas. Dada a extensão regional do aquífero Guarani, esta correlação é indicativa da existência de recursos geotérmicos de grande porte no interior do Estado de São Paulo.

Agradecimentos

Os recursos computacionais para conclusão desse trabalho foram obtidos através de recursos concedidos

pela Fundação Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ (Processo nº E-26/150.954/99).

Este trabalho é contribuição do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional – MCT em comemoração aos 450 anos da Cidade de São Paulo.

Referências

American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1976, Basic data file from AAPG Geothermal Survey of North America: Univ. of Oklahoma, Norman.

Del Rey, A. C. and Hamza, V.M., 1989, Terrestrial Heat Flow Variations in the Northeastern Part of the State of São Paulo: A Case for Transport of Geothermal Heat by Inter fracture Fluid Flows. Em: Hydrogeological Regimes and their subsurface thermal effects, American Geophysical, v.47, ed. Washington, E.U.A., p. 137-148.

Gomes, A.J.L., Hamza, V.M., 2003, Avaliação de Recursos Geotermiais do Estado do Rio de Janeiro, 8^o.International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro.

Hamza, V. M., Verma, R. K., 1969, The Relationship of Heat Flow with Age of Basement Rocks, Bull. Volcan., Vol XXXIII-1, p. 123-152.

Hamza, V. M. Eston, S. M., Araújo, R. L. C., 1978, Geothermal energy prospects in Brazil, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 117, pp. 180-195.

Hamza, V. M., 1980, Estimates of Terrestrial Heat Flow and radiogenic heat production in Eastern Brazil, in *Anais do XXXI Congr. Bras. de Geologia*, vol. 2, pp. 1149-1160.

Hamza, V.M., Eston, S. M., 1983, Assessment of Geothermal resources of Brazil - 1981, *Zbl. Geol. Palaontol. Teil I*, p.128-155 Stuttgart, Alemanha.

Hamza, V.M., Frangipani, A., Becker, E. A., 1986, Mapas de Geotermas, Gradientes Térmicos e Recursos Geotermiais do Estado de São Paulo - Fase 1: Regiões do Governo de São José dos Campos, Taubaté, Guaratinguetá e Cruzeiro., Relatório Interno, PROMINÉRIO, São Paulo.

Hamza, V.M., Becker, E.A., 1992, Estudo das Propriedades Termofísicas e do Regime Térmico do Maciço Rochoso no local do Terminal Almirante Barroso, São Sebastião, SP, Relatório Interno, PETROBRÁS.

Hamza, V.M., Muñoz, M., 1996, Heat Flow map of South America, *Geothermics Vol. 25, nº 6*, pp. 599-646, Inglaterra.

Hamza, V.M. and Silva Dias, F. J. S., 2003, Functional Representation of regional heat flow in South America: Implications for the occurrence of low-temperature geothermal resources, *Geothermal Resources Council Transactions*, V. 27, pp. 615-618.

Higashi, T.H. and Hamza, V.M., 1996, Geothermal Investigations in an area of induced seismic activity. *Tectonophysics*, Amsterdam, v. 253, p. 209-225

Higashi, T.H., 1999, Estudos geofísicos para explicar a sismicidade induzida e orientar a exploração de água

subterrânea em Nuporanga, Tese de Doutorado, IAG / USP, São Paulo.

Hurter, S.J., Eston, S.M. e Hamza, V.M., 1983, Coleção Brasileira de Dados Geotérmicos Série 2 – Fontes Termais. Publicação No. 1233, *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo s/a – IPT*, pp. 111

Meister, E.M., 1973, Gradientes geotérmicos nas bacias sedimentares Brasileiras, *Boletim Técnico Petrobrás*, 16 (4), 221-232.

Ribeiro, F.B., 1988, Estudo sobre o problema da determinação de temperaturas de equilíbrio em poços afetados pela atividade de perfuração, Tese de Doutorado, IAG / USP, São Paulo.

Santos, J., Hamza, V.M., Shen, P.Y., 1986, A method for determining terrestrial heat flow density in water wells. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 4, p. 45-53.

Vitarello, I.; Hamza, V. M.; Pollack, H. N.; Araujo, R. L. C.; 1978, *Geothermal Investigations in Brazil*, *Rev. Brasil. Geociências*, vol. 8, pp. 71-89.

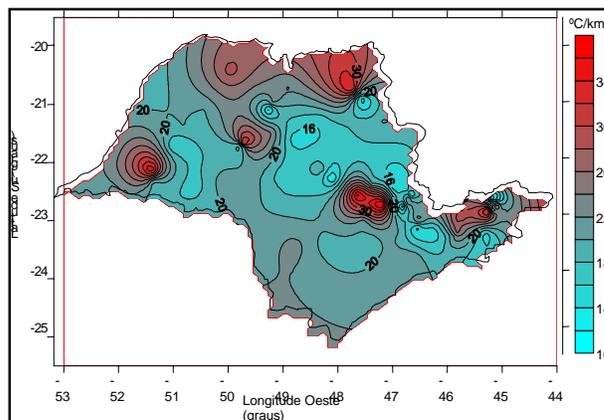


Figura 2 – Mapa de distribuição do gradiente geotérmico no Estado de São Paulo

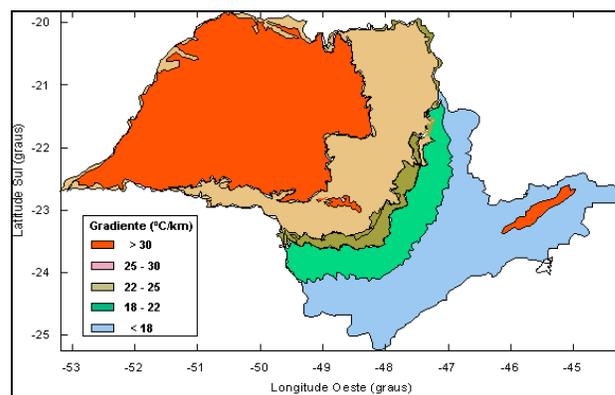


Figura 3 – Distribuição do gradiente geotérmico médio das principais unidades litoestratigráficas do Estado de São Paulo..