



AVALIAÇÃO DE RECURSOS GEOTERMAIS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Antonio Jorge de Lima Gomes* (ajlgomes@on.br) e Valiya M. Hamza (hamza@on.br) - OBSERVATÓRIO NACIONAL, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Results of geothermal investigations carried out at 72 localities (in 30 municipalities) have been used in evaluating thermal energy resources of the State of Rio de Janeiro. The investigations included measurements of geothermal gradient and thermal conductivity as well as determination of heat flow density. In most areas heat flow is found to be low to normal, being less than 60mW/m². However in several isolated areas, generally close to localities of alkaline intrusions and fault systems, heat flow is found to be higher than normal, reaching values in excess of 100 mW/m². The data were used in preparing maps of gradient and heat flow, which in turn were employed in determining temperature profiles of the upper crust and in assessment of resources based on the volumetric method.

The results obtained indicate that the overall resource base is about 1.03 x 10²³J. The accessible resource at depths of less than 3 km is estimated as 9,3x10²¹J. The recoverable fraction of this resource is estimated at 4,7x10²⁰J. The geographic distribution of resources indicates however considerable variations, apparently related to the geologic characteristics of the main tectonic units.

Introdução

No período de 1999 a 2002 foi realizado para um programa de avaliação de recursos geotermiais em escala regional no estado de Rio de Janeiro. Como parte deste projeto foram efetuadas medidas de gradiente e do fluxo geotérmico em 72 localidades, distribuídos em 30 municípios. Esses resultados foram utilizados na avaliação de recursos de energia térmica na crosta superior sob a área de estudo.

Os gradientes térmicos foram determinados por três métodos distintos: o convencional (CVL), o de temperatura convencional do fundo de poço (CBT) e o aquífero (AQT). Utilizamos também dados de fontes termais de Hurter et al (1987, 1983) com geotermômetros de SiO₂, Na/k e Na-K-Ca.

O mapeamento do gradiente e do fluxo geotérmico permitiu a avaliação das variações no campo térmico na área de estudo.

O método de volume (Muffler e Cataldi, 1977 e 1978) foi utilizado para a avaliação dos recursos geotermiais.

Metodologia

Recursos geotermiais consistem basicamente de energia geotermal, então avaliar recursos geotermiais consiste em estimar a energia térmica em subsuperfície para uma determinada região. Recurso Geotermal é uma parte do

recurso base, incluindo as reservas, o qual pode tornar-se viável sua exploração para certas condições tecnológicas e econômicas. (Netschert, 1958, Schurr e Netschert, 1960). O recurso base (RB) é a soma total de toda a energia geotérmica existente na crosta terrestre em uma determinada área ou região (Muffler e Cataldi, 1977 e 1978).

O cálculo do Recurso Base (Q) foi efetuado utilizando a seguinte relação:

$$Q = \rho c_p A Z (T - T_0) \quad (1)$$

onde ρ é a densidade média da crosta superior, c_p o calor específico, A área, T a temperatura na profundidade Z . e T_0 a temperatura anual média da região.

No caso de regime térmico estacionário e produção de calor constante o excesso de temperatura ($T_E = T - T_0$) pode ser estimado usando a seguinte relação:

$$T_E(z) = \frac{q_0}{k} z - \frac{A_0}{2k} z^2 \quad (2)$$

onde q_0 é a densidade de fluxo de calor, k a condutividade térmica e A_0 taxa de produção de calor.

A integração da equação (2) e a sua substituição na equação (1) permitem determinar recurso associado ao excesso de temperatura (T_E):

$$Q = \rho c_p A Z \left(\frac{q_0 z^2}{2k} - \frac{A_0 z^3}{6k} \right) \quad (3)$$

De acordo com a prática adotada por Muffler e Cataldi (1978) utilizou-se o valor de 10 km para a profundidade de referencia no calculo de recurso base.

O uso da equação (3) exige avaliação de gradiente e fluxo geotérmico. Utilizamos a temperatura T_0 das normais climatológicas do Ministério da Agricultura (1969) e os métodos descritos por Kappelmeyer e Haenel (1974, 1988), Ribeiro (1987), Hamza et al (1981 e 1996) e Santos et al (1986).

Para calculo do gradiente geotérmico, pelo método CVL, determinamos a taxa de variação entre as temperaturas (ΔT) e a profundidade do poço (ΔZ). No método CBT o gradiente determina-se pela razão entre a diferença da temperatura do fundo do poço (T_{fp}) e a temperatura anual média da superfície da região (T_0) pela diferença da distância vertical entre os dois pontos (ΔZ). De acordo com Santos et al (1986) o gradiente CBT será:

$$\Gamma_{CBT} = T_{FP} - T_0 / Z_{FP} - Z_s \quad (4)$$

No método geoquímico as temperaturas em profundidade foram calculadas com base nas fórmulas de:

-Fournier (SPV-1981):

$$T_p = [1309/(5.19 - \log C)] - 273.15 \quad (5)$$

-Fournier (PMV-1981):

$$T_p = [1522/(5.75 - \log C)] - 273.15 \quad (6)$$

-Verma (1995):

$$T_p = C1 + C2S + C3S^2 + C4S^3 + C5 \log S \quad (7)$$

O gradiente é então determinado por:

$$\Gamma = (T_z - T_0)/(m * \lambda) \quad (8)$$

onde T_z é a temperatura na profundidade z , Γ o gradiente térmico, m uma constante e λ a condutividade térmica média. O fluxo geotérmico (q) é determinado pela lei de

Fourier que aplicada num meio isotrópico (Kappelmeyer et al, 1974), nos apresenta:

$$q = \Gamma \cdot \lambda_m \pm \sigma_q \quad (9)$$

onde: λ_m a condutividade média da subsuperfície, Γ o gradiente térmico e σ_q o desvio padrão.

Resultados de perfilagens térmicas

Os gradientes determinados pelo método Convencional CVL são apresentados na Tabela (1).

Tabela 1 – Valores dos gradientes CVL.

Município	Local	Gradiente (°C/Km)		
		Valor	σ_g	
Angra dos Reis	Bonfim	46	2,2	
	Virada Leste	23	1,1	
Campos	Baixa Grande	19	9,3	
	Boa Vista	26	0,5	
	São Sebastião	35	38,5	
Duas Barras	Horto	19	0,3	
	Centro	15	0,2	
	Centro	15	0,1	
	Centro	17	12,8	
	Maricá	Manoel Ribeiro	20	10,2
	Miracema	Centro	20	12,8
Niterói	Cafubá	14	0,1	
Paraíba do Sul	Cruz das Almas	17	10	
Porciúncula	Santa Clara	13	0,4	
Resende	Centro	62	1,68	
	Centro	26	20	
Rio Claro	PassaTres	39	15,1	
Saquarema	Gj. S. Antonio	15	0,3	
S.Seb.do Alto	V.Barro-Centro	7	0,14	
	V.Barro-Centro	9	19,2	
Seropédica	Orfanato	23	0,13	
	P.S.Piranema	22	0,16	
Teresópolis	Meudon	22	0,16	
	Faz. Texas	22	0,02	
	Meudom	20	0,02	
	Barra do Imbui	21	0,02	
	Vassouras	Massambará	14	0,06
Volta Redonda	Padre Josimo	20	14,2	

Os gradientes obtidos pelo método de temperatura do fundo do poço (CBT) e aquífero (AQT) são apresentados na Tabela (2).

Tabela 2 – Valores dos Gradientes CBT e AQT.

Município	Local	Gradiente (°C/Km)	
		CBT	σ_g
Cambuci	Monte Verde	25	11,9
Campos	Consel. Josino	21	13,6
Carapebus	Centro	30	11,1
Cordeiro	Matadouro	20	0,5
Duas Barras	Centro	16	12,8
Itaocara	Cel. Teixeira	19	0,2

	Jaguarembé	17	10
Itatiaia	Xerox 2	17	11,1
Laje de Muriaé	Centro	23	10
Maricá	Manoel Ribeiro	26	13,1
	Manoel Ribeiro	23	15,1
Miguel Pereira	Centro	16	13,5
Miracema	Paraíso Tobias	21	10
Niterói	Piratininga	61	33,3
São Gonçalo	Tribobó	44	55,6
Paraíba do Sul	Ponte Preta	17	38,4
Resende	Centro	33	20
Rio Bonito	Boa Esperança	33	9,6
S.Sebast.do Alto	V.Barro-Centro	9	9,4
Sapucaia	Aparecida	14	12,8
	Jamapara	34	13,5
	Jamapara	46	12,5
Silva Jardim	Faz. Brasil	51	50
Teresópolis	Águas Quentes	64	55,6

Resultados de Geotermômetros

Os resultados dos gradientes por geotermômetros são apresentados nas Tabelas (3), (4) e (5),

Tabela 3 – Gradiente pelo método SiO2.

Município	Local	Gradiente (°C/Km)	
		SiO2	σ_g
Campos	Pedra Alecrim	34	25,9
Itaguaí	Poço 2	49	25,6
Niteroi	Ingá	60	25,7
Paraíba do Sul	Salutaris	46	25,6
Rio Bonito	Catimbau	69	25,7
Rio de Janeiro	Santa Cruz	29	25,5
St. A. de Pádua	Iodetada	45	25,6
S. Gonçalo	Ag. S. Gonçalo	51	25,7

Tabela 4 – Gradiente pelo método Na/K.

Município	Local	Gradiente (°C/Km)	
		Na/K	σ_g
Paraíba do Sul	Salutaris	26	14
Rio Bonito	Catimbau	69	25,7
Rio de Janeiro	Agua Meyer	70	51
	Nazareth	57	40
	Silva Manuel	24	13
St. A. de Pádua	Iodetada	31	19

Tabela 5 – Gradiente pelo método Na-K-Ca.

Município	Local	Gradiente (°C/km)	
		Na-K-Ca	σ_g
Paraíba do Sul	Salutaris	41	± 2,6
Rio Bonito	Catimbau	69	± 3,6
Rio de Janeiro	Agua Meyer	64	± 3,4
	Silva Manuel	29	± 2,8
St. A. de Pádua	Iodetada	45	± 2,7
S. Gonçalo	Ag.S. Gonçalo	51	± 2,9

Resultados de condutividade e fluxo térmico

As determinações de condutividade térmica foram realizadas em 90 amostras no Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional, cujos valores são apresentados juntamente com os de fluxo geotérmico na Tabela (6):

Tabela 6 – Condutividade e fluxo geotérmico.

Município	Local	Condutividade (W/m K)		Fluxo (mW/m ²)	
		λ	σ_λ	q	σ_q
Angra Reis	Bonfim	2,9	1,0	134	53
	Virada Leste	2,9	0,8	67	26
Cambuci	Monte Verde	3,0	1,2	74	65
Campos	Baixa Grande	2,7	0,8	50	40
	Boa Vista	2,7	0,8	71	22
	Consel. Josino	2,7	0,8	58	54
	São Sebastião	2,2	0,8	78	113
	Uenf-Horto	2,8	0,8	56	16
	Pedra Alecrim	2,7	0,8	92	97
Carapebus	Centro	2,7	0,8	82	54
Cordeiro	Matadouro	3,1	1,3	61	27
Duas Barras	Centro	3,1	1,3	46	20
	Centro	3,1	1,3	46	20
	Centro	3,1	1,3	52	61
	Centro	3,1	1,3	50	60
Itaguaí	Poço 2	3,0	1,7	149	163
Itaocara	Cel. Teixeira	3,0	2,0	57	39
	Jaguarembé	3,0	2,0	52	64
Itatiaia	Próximo Dutra	2,7	0,8	45	43
Laje Muriaé	Centro	3,0	1,2	70	58
Maricá	Manoel Ribeiro	2,7	1,3	68	68
	Manoel Ribeiro	2,7	1,3	54	53
	Manoel Ribeiro	2,7	1,3	62	70
Mig.Pereira	Centro	3,1	1,3	50	62
Miracema	Centro	3,0	1,2	61	63
	Paraíso Tobias	3,0	1,2	62	54
Niterói	Cafubá	3,1	1,3	44	18
	Piratininga	3,1	1,3	188	181
	Ingá	3,1	1,3	185	156
Par. do Sul	Cruz Almas	3,1	1,3	53	52
	Ponte Preta	3,1	1,3	53	140
	Salutaris	3,1	1,3	142	137
	Salutaris	3,1	1,3	127	59
	Salutaris	3,1	1,3	79	75
Porciúncula	Santa Clara	3,0	1,2	39	18
Resende	Centro	2,7	0,8	89	80
	Centro	2,7	0,8	167	54
	Centro	2,7	0,8	70	75
Rio Bonito	Boa Esperança	2,7	0,8	89	52
	Catimbau	2,7	1,5	186	173
	Catimbau	2,7	1,5	186	113
	Catimbau	2,7	1,5	186	173
Rio Claro	PassaTres	3,1	2,1	121	127
Rio Janeiro	Agua Meyer	2,7	1,5	172	105
	Agua Meyer	2,7	1,5	189	242
	Nazareth	2,7	1,5	153	194
	Santa Cruz	2,7	1,5	78	112
	Silva Manuel	2,7	1,5	65	70
	Silva Manuel	2,7	1,5	78	51
Sapucaia	Aparecida	3,5	2,0	49	72

	Jamapara	3,5	2,0	119	114
	Jamapara	3,5	2,0	161	134
S.A. Pádua	Iodetada	3,0	2,0	135	165
	Iodetada	3,0	2,0	135	96
	Iodetada	3,0	2,0	94	117
S. Gonçalo	Tribobó	3,1	1,3	134	226
	Ag. S. Gonçalo	3,3	1,8	169	175
	Ag. S. Gonçalo	3,3	1,8	169	99
S.S.do Alto	V.Barro-Centro	3,5	2,0	26	15
	V.Barro-Centro	3,5	2,0	30	50
	V.Barro-Centro	3,5	2,0	33	86
Saquarema	Gj. S. Antonio	2,7	0,8	42	13
Seropédica	Orfanato	2,7	0,8	61	18
	P.S.Piranema	2,7	0,8	59	18
Silva Jardim	Faz. Brasil	2,7	0,8	137	176
Teresópolis	Água Quente	3,1	1,3	196	254
	Meudon-BC2	3,1	1,3	66	29
	Faz. Texas	3,1	1,3	68	29
	Meudom-FVM	3,1	1,3	62	26
	Barra do Imbui	3,1	1,3	65	28
Vassouras	Massambará	3,9	1	55	14
	V. Redonda	Padre Josino	2,8	1,2	57

Avaliação de Recursos

Como procedimento básico na avaliação de recursos foram determinadas as variações no campo térmico da crosta superior, através da elaboração dos mapas de gradiente e do fluxo geotérmico, apresentados nas figuras (1) e (2) respectivamente. Em seguida, as áreas entre as curvas de isovalores nesses mapas foram determinadas por procedimentos gráficos. Os dados geológicos foram obtidos de Almeida (1983), Oliveira (1987), Fonseca (1998), Filho et al (1999).

Com base nesses resultados foram determinados os recursos apresentados na tabela (7).

Tabela 7 – Recurso Base por variação de Fluxo.

Fluxo Térmico (mW/m ²)	Área (km ²)	Recurso Base (J)	
		Calculado	Erro
20 - 40	16	1,65E+19	4,12E+17
40 - 60	7518	1,35E+22	3,37E+20
60 - 80	27532	7,06E+22	1,76E+21
80 - 100	6178	2,06E+22	5,15E+20
100 - 120	866	3,55E+21	8,88E+19
> 120	44	2,17E+20	5,41E+18
Médio	43910	1,00E+23	2,50E+21

A fim de avaliar a distribuição de recursos nas unidades geotectônicas foram determinadas as áreas correspondentes das principais províncias geológicas. Os valores do recurso base por província geológica são apresentados na Tabela (8).

Na Tabela (9) apresenta-se a variação das temperaturas em profundidade junto com as partes proporcionais de recurso base e o recurso recuperável. As estimativas de recurso recuperável, apresentadas na última coluna desta tabela, foram determinadas considerando uma porosidade média de 5%.

Na figura 3 apresentamos o mapa do recurso base unitário geotermal do Estado do Rio de Janeiro.

Conclusões

O conjunto de resultados obtidos indica que o fluxo geotérmico é inferior a 80 mW/m² na maioria dos locais, o que pode ser considerado como representativo do regime térmico das áreas Pré-cambrianas, não afetadas por atividades tectônicas e magmáticas recentes. Nestas áreas, temperaturas maiores de 100°C podem ser encontradas somente em profundidades superiores a três quilômetros. Conseqüentemente a probabilidade de ocorrência de sistemas geotermiais nessas áreas, em profundidades acessíveis para exploração econômica, é pequena.

Tabela 8 – Recurso Base por província geológica.

Classificação Geológica	Km ²	Calculado	Erro
Embasamento Metamórfico	29,889	7,025E+22	3,51E+21
Sedimentos Fluviais e Marinheiros	8,551	2,01E+22	1,00E+21
Batólitos	5,037	1,184E+22	5,92E+20
Intrusões Alcalinas	433	1,018E+21	5,09E+19
Total	43,910	1,032E+23	5,16E+21

Tabela 9 – Recurso recuperável em profundidades de até 10 km.

Zmax (m)	Tz (°C)	T _E (°C)	Recursos (J)	
			Base	Recuperável
500	34,8	5	2,63E+20	1,31E+19
1000	45,5	11	1,05E+21	5,24E+19
1500	56,1	16	2,35E+21	1,18E+20
2000	66,7	21	4,17E+21	2,09E+20
3000	87,5	32	9,34E+21	4,67E+20
10000	224,0	103	1,00E+23	5,00E+21

Os valores dos gradientes geotérmicos encontrados nas regiões pré-cambrianas encontram-se entre 14 e 26 °C/km. Por outro lado, as faixas de gradientes térmicos encontrados nas bacias sedimentares (como Campos, Resende, Carapebus) são ligeiramente superiores, estando no intervalo de 19 a 33 °C/km.

Os valores acima de 33 °C/km foram encontrados somente em locais próximos de intrusões alcalinas, como foi verificado nas regiões de São Gonçalo e Rio Bonito.

O recurso base geotérmico total do estado do Rio de Janeiro foi estimado em 1,03x10²³J. A grande parte deste recurso se encontra nas áreas onde a densidade de fluxo está entre 50 e 70 mW/m². Isso corresponde a uma área de 27531 Km² (70% da área total do Estado).

Agradecimentos:

O presente projeto de avaliação de recursos geotermiais recebeu auxílio financeiro da Fundação Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Processo nº E-26/151. 920/2000).

Bibliografia:

Filho, A. T., Teixeira, Rodrigues, A. L., 1999, O alinhamento das rochas alcalinas Poços de Caldas-Cabo Frio (RJ) e sua continuidade na cadeia Vitória-Trindade, Revista Brasileira de Geociências, pág. 189-194.

Fonseca, M. J. G., 1998, Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro, Escala 1:400.000, Publicação Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), Brasília (DF).

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

Hamza, V. M., Eston, Sergio M., 1981, Assesment of Geothermal resources of Brazil, Zbl. Geol. Palaontol. Teil I, Stuttgart, Alemanha, p.128-155.

Haenel, R., Mongelli, F., 1988, Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination, p.353-389.

Hurter, S. J., 1987, Aplicação de geotermômetros químicos em águas de fontes brasileiras na determinação do fluxo geotérmico. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo.

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

Kappelmeyer, O., Haenel, R., Geothermics, Geoexploration Monographs, Serie 1 - Nº 4, Berlim, Stuttgart, Alemanha, 1974.

Ministério da Agricultura, 1969, Normais Climatológicas (Minas Gerais – Espírito Santo - Rio de Janeiro – Guanabara), Volume 3, Rio de Janeiro.

Muffler, L. J. P., Cataldi, R., 1978, methods for regional assesment of geothermal resources, Geothermics, 7, 2-4, pp 53-89.

Muffler, L. J. P., Guffanti, M., 1979, Introduction, In Assesment of Geothermal Resources of United States - 1978, Geological Survey Circular 790.

Muffler, L. J. P., 1981, Geothermal Resources Assesment – Geothermal Systems: Principles and case histories.

Oliveira, J. A. D., Machado Filho, L., Ribeiro, M.W., Liu, C.C. e Meneses, P.R., 1977, Mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, Escala 1:400.000. Departamento de Recursos Minerais, Rio de Janeiro.

Ribeiro, F. B., 1987, Estimation of formation Temperature and Heat Flow from measurements made in shallow water wells, Revista Brasileira de Geofísica, nº2 vol. 5, pp.117-126.

Netschert, B. C., 1958, The future supply of oil and gas, Johns Hopkins University Press.

Santos, J., Hamza, V. M., Shen, P., 1986, A method for measurement of terrestrial heat flow density in water wells, Revista Brasileira de Geofísica, Vol 4 nº2, pp. 45-53.

Schurr, S. H., Netschert, B. C., 1960, Energy in the American economy, Johns Hopkins University Press.

Verma, Surendra P., Santoyo, Edgar, 1995, New improved equations for Na/K and SiO₂ Geothermometers by error propagation, World Geothermical Congress, Florence, Italy, pp. 963-968.

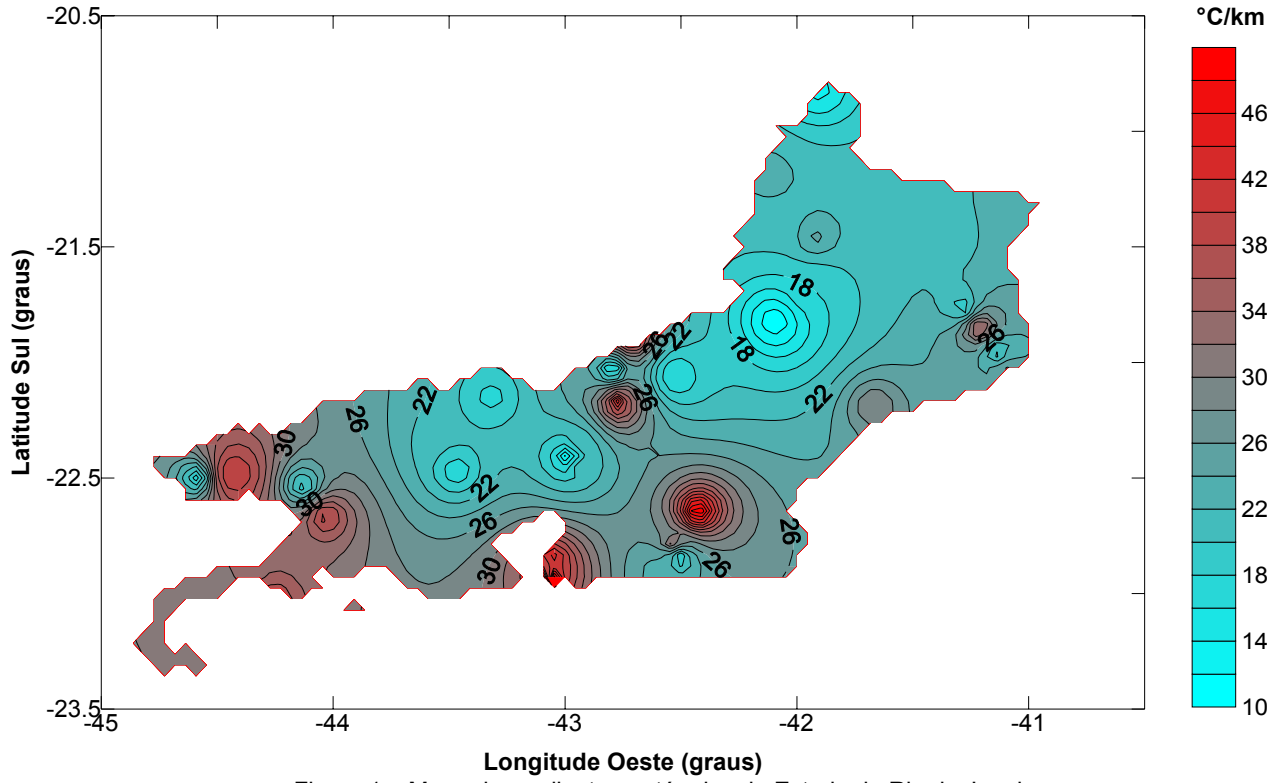


Figura 1 – Mapa do gradiente geotérmico do Estado do Rio de Janeiro. As curvas de isovalores estão em unidades de $^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

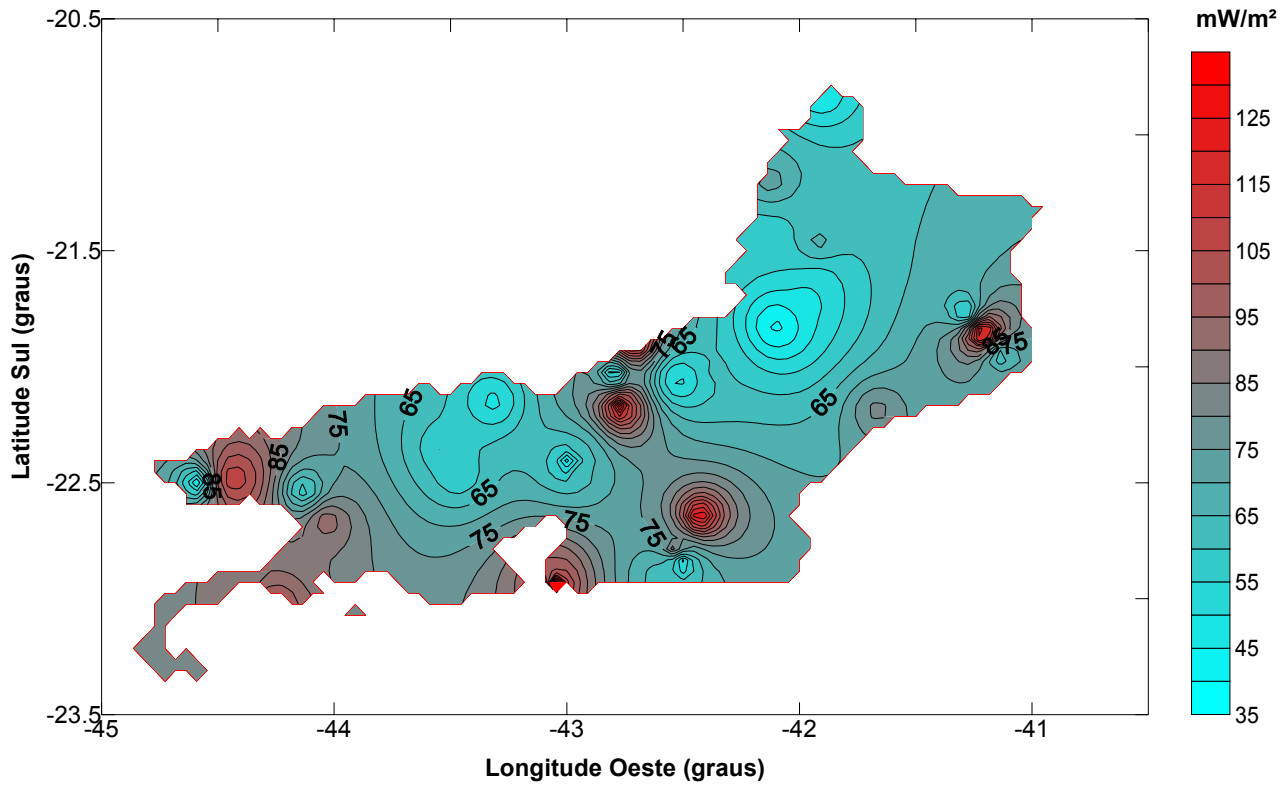


Figura 2 – Mapa de fluxo geotérmico do Estado do Rio de Janeiro. As curvas de isovalores estão em unidades de mW/m^2 .

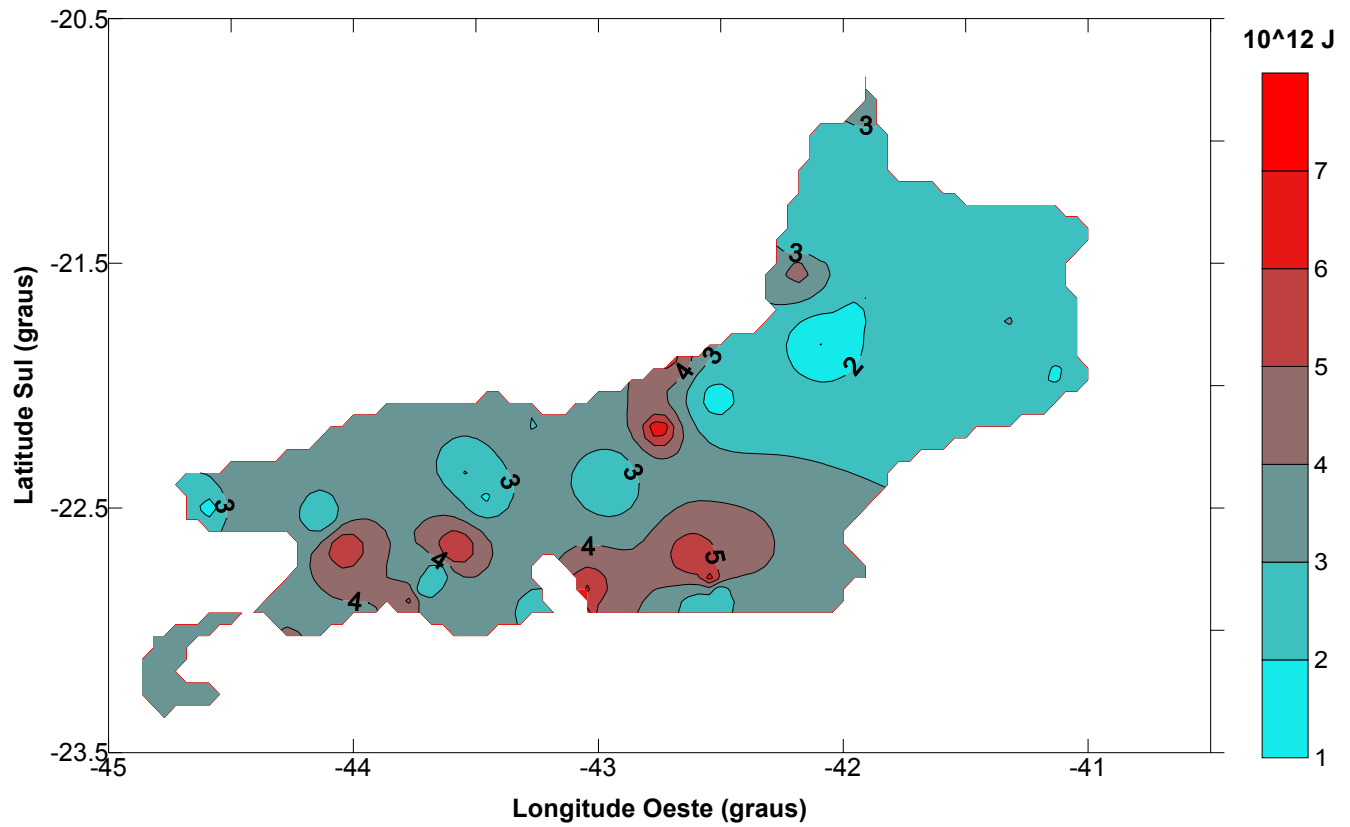


Figura 3 – Mapa do recurso base unitário geotermal do Estado do Rio de Janeiro.
As curvas de isovalores estão em unidades de $10^{12}J$.