Variações das Mudanças Climáticas Recentes pelo Método Geotérmico da Região Centro-Sul Fluminense

Fábio Carlos Cavalcante de Aguiar, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.
Suze Nei Pereira Guimarães, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.
Fábio Pinto Vieira, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
Eduardo Ramon Ribeiro Araújo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brasil.

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, 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

Nas últimas décadas, os perfis térmicos adquiridos em medidas diretas de temperatura, têm sido empregados como um método geofísico eficaz na determinação dos efeitos térmicos da crosta rasa, resultantes de variações térmicas das mudanças climáticas recentes. Visando a modelagem geotérmica e avaliação dessas variações na região centro-sul do estado do Rio de Janeiro, prevê-se o uso de dados geofísicos/geotérmicos, geológicos e climatológicos. Este estudo conta com a análise das variações climáticas registradas em perfis geotérmicos medidos em 25 poços. Os resultados apontam para um evento de aquecimento variando de 2 a 3,5°C nas últimas 3 décadas.

Introdução

As flutuações climáticas exercem influências significativas sobre o balanço energético da crosta rasa da Terra, com consequências notáveis, tanto na geosfera como na biosfera. Os efeitos térmicos dessas alterações energéticas, penetram em profundidade numa forma muito semelhante das variações diurnas e sazonais da radiação solar. O surgimento de fenômenos tais o *El Niño* e o *Efeito Estufa* são frequentemente associados como manifestações das mudanças climáticas recentes. Por meio dessa premissa, estudar essas variações climáticas, podem indicar regiões que merecem maior concentração de métodos que mitiguem ou minimizem essas alterações e seus efeitos.

Para este estudo, baseamos a quantificação dessas variações no método geotérmico, ou seja, na medição direta do intercâmbio de gradiente geotérmico entre a superfície e as camadas adjacentes da Terra. Foram utilizados dados geotérmicos distribuídos em 25 poços na região centro-sul fluminense, mais especificamente nos municípios de: Angra dos Reis, Itatiaia, Miguel Pereira, Paraíba do Sul, Resende, Rio Claro, São Gonçalo, Seropédica, Teresópolis, Vassouras, Comendador Levy Gasparian, Volta Redonda e Niterói. Essa região é marcada por ser parte da bacia hidrográfica do Guandu, que abastece hidrograficamente boa parte da região metropolitana.

De uma forma geral, conforme observamos na Figura 1, a região centro-sul fluminense pertence ao Escudo Atlântico como todo o estado do Rio de Janeiro e é composta por rochas cristalinas que formam seu embasamento. Essas rochas estão dispostas em faixas continuas de direção NE-SW, sendo que a região mais a norte é formada pelo terreno ocidental intervalada pelo terreno Paraíba do Sul. Já na região mais ao sul envolve uma cobertura cenozoica e o arco magmático Rio Negro com presença de complexos alcalinos, granitos pós-tectônicos e sin-tectônicos (Dantas et al., 2020).

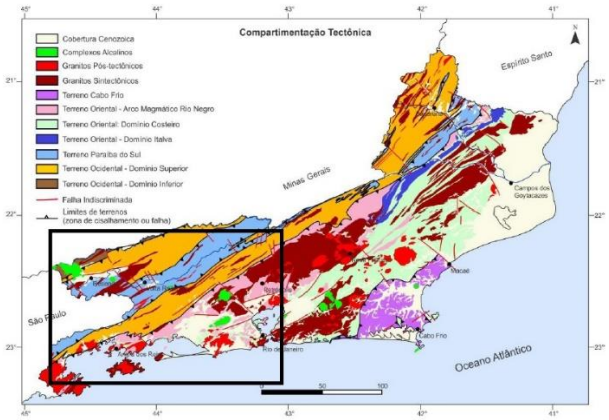

Figura 1 – Compartimentação tectônica do território fluminense. Polígono preto representa a área de estudo. (Modificado de Heilbron, et al. 2016).

Os dados geotérmicos utilizados foram compostos de: informações de identificação, perfilagem térmica (profundidade vs temperatura), gradiente geotérmico e condutividade térmica. Procurou-se então apresentar uma síntese de dados e informações sobre a magnitude e duração das mudanças climáticas na região de estudo o que possibilita investigar os agentes causadores.

Metodologia

A distribuição de temperaturas em profundidades na crosta rasa da Terra, especialmente nos primeiros metros é afetada tanto pela energia solar que alcança a superfície, pela produção de calor radiogênico das rochas e também pelo fluxo de calor proveniente do interior da Terra. No entanto, em se tratando de poucos metros de profundidade, em regiões com rochas não aflorantes, as variações térmicas se atêm ao contexto do solo, sendo que a produção de calor radiogênico nesta faixa é considerada irrelevante.

A velocidade de propagação dos efeitos climáticos em subsuperfície depende da difusividade térmica do solo e a amplitude da perturbação decresce com a profundidade.

Como resultado, os sinais térmicos das mudanças paleoclimáticas encontram-se no campo geotérmico atual das camadas próximas à superfície (Birch, 1948). A Figura 2 ilustra a distribuição da temperatura em profundidade medido em um poço, observe que maiores perturbações se encontram na profundidade de até 50m para esse caso.

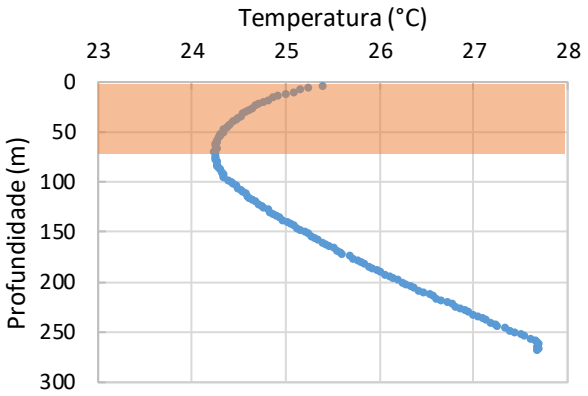

Figura 2 – Perfil geotérmico do poço CSF014, a região em destaque refere-se as medidas afetadas diretamente por variações climáticas advindas da superfície da Terra.

De acordo com os modelos discutidos por Carslaw & Jaeger (1959), uma solução analítica simples da equação de condução-advecção de calor padrão pode ser obtida assumindo uma variação da lei de potência da temperatura (T) com o tempo (t), com as seguintes condições iniciais:

$$T(z, t = 0) = T_0 + az \quad (1)$$

$$T(z = 0, t) = T_0 + \varphi t \quad (2)$$

onde φ é a taxa de variação linear da temperatura em profundidade. Assim,

$$T(z,t) = T_0 + a(z - vt) + \frac{1}{2v}(\varphi + va)\ x\ \left[(vt - z)\,.\,erfc\left(\frac{z-vt}{2\sqrt{Dt}}\right) + (vt + z)\ exp\left(\frac{vz}{a}\right)\ erfc\left(\frac{z+vt}{2\sqrt{\emptyset t}}\right)\right] \quad (3)$$

Em que *erfc* é função erro complementar, $\Phi=\lambda(c\rho)$ é a difusividade termal do meio e $v=qc_w\rho_w(c\rho)^{-1}$ a velocidade de escoamento do calor no meio.

Para quantificar a recente variação climática na superfície da Terra supomos que ela possa ser representada por uma relação de potência em tempo (Lanchenbruch & Marshall, 1986) assim,

$$v(z,t) = D\left(\frac{t}{t^*}\right)^{n/2} \quad (4)$$

onde t* é a duração do evento climático, ou seja, idade da perturbação climática (anos) e D a magnitude da perturbação na superfície, n é um parâmetro que determina a forma da variação climática. Para a condição inicial (t = 0) dado v (z, 0) = 0, a solução é:

$$v(z,t) = D2^n\,\Gamma\left(\frac{n}{2}+1\right) i^n erfc\left(\frac{z}{\sqrt{4\Theta t^*}}\right) \quad (5)$$

Em que Γ é a função gama e *inerfc* é a enésima-integral da função erro complementar.

Em estudos que visam extrair informações relacionadas ao clima em registros de temperatura de poços, é prática normal remover o componente de variação de temperatura decorrente do fluxo de calor profundo.

Em muitos casos, os dados de temperatura de partes mais profundas do poço, que são relativamente livres de perturbações de superfície, fornecem um meio conveniente de determinar o gradiente geotérmico "não perturbado". O perfil de temperatura residual, obtido após subtrair aquele proveniente do gradiente geotérmico, pode ser considerado como contendo sinais relacionados ao clima.

Para a análise dos perfis geotérmicos foram construídos gráficos preliminares de perfis que indicam as distribuições verticais de temperaturas observadas e estes apresentaram alguns sinais de perturbações térmicas. Para a extração desses sinais, remove-se o efeito do gradiente térmico local (Δ), e então, as temperaturas residuais (T_R) calculadas dessa forma são expressas como funções da profundidade (z):

$$T_R(z) = T(z) - [T_0 + \Delta z] \quad (6)$$

onde T_0 é a temperatura na superfície da Terra geralmente monitorada para os últimos 50 anos. As curvas de melhor ajuste permitiriam então a determinação dos parâmetros do modelo. A Figura 3 ilustra as duas curvas (teórica e modelada) utilizadas na quantificação das variações climáticas calculadas em um poço em estudo.

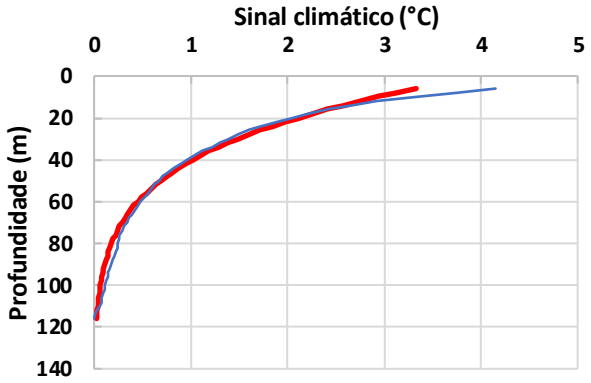

Figura 3 – Variação do sinal climático modelado no poço CSF005. A curva em azul representa o sinal climático por meio do gradiente geotérmico medido e a curva em vermelho o sinal climático ajustado ao modelo.

Maiores informações sobre a metodologia podem ser encontradas em Hamza, 2007. O valor da condutividade térmica (λ) do local onde situa-se o poço é calculada pela média ponderada dos diferentes tipos litológicos pela sua espessura (*e*) ao longo de toda coluna litológica do poço, de modo que essa média representa bem a influência dos litotipos no calor que chega na superfície da Terra. Assim,

$$\lambda_{pond} = \frac{\sum e.\lambda}{\sum e} \quad (7)$$

Os valores médios de cada tipo litológico foram retirados de Guimarães et al., 2022. A partir desses dados de condutividade térmica e gradiente geotérmico podemos

estimar o fluxo de calor na superfície tanto advindo do interior do planeta quanto somado as perturbações ora mencionadas.

Resultados

A base de dados geotérmicos utilizados neste estudo, envolviam 25 poços distribuídos sobre toda a região centro-sul do estado do Rio de Janeiro, conforme ilustrado na Figura 4.

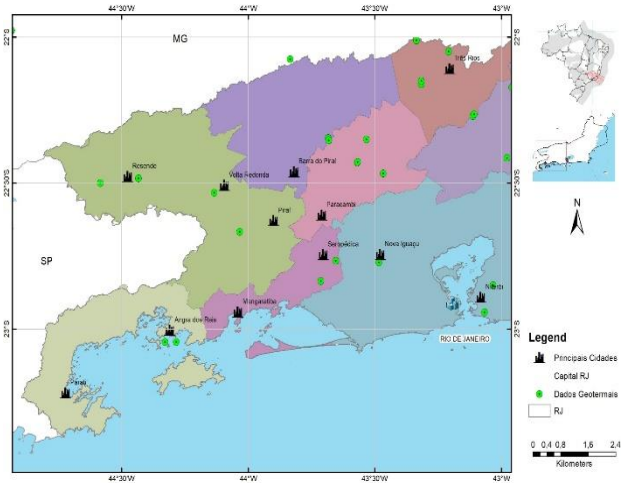

Figura 4 – Distribuição espacial dos dados geotérmicos utilizados neste estudo.

Contudo, apenas o conjunto de dados obtidos pelo método convencional com profundidade adequada e perturbações minimizadas como as advindas de movimento de água subterrânea, relevo moderado, etc., foram apropriados para o estudo de variação climáticas, ao total foram utilizados 14 dados na modelagem, o resumo encontra-se na Tabela 1.

Tabela (1) – Resultados de modelagem direta das variações climáticas na região centro-sul do estado do Rio de Janeiro.

ID	Coordenadas		z	ΔT	IM	λ	Γ	Q
	Long.	Lat.						
CSF003	-22.5000	-44.5833	90	2.5	80	2.4	22	53
CSF004	-22.4667	-43.4667	80	2.1	55	4.9	14	73
CSF005	-22.9431	-43.0672	116	4,0	50	3,0	20	62
CSF007	-22.1500	-43.3167	100	1.3	95	2.9	17	51
CSF009	-22.4833	-44.4333	50	2.5	30	2,0	32	67
CSF011	-22.4833	-43.4333	50	3,0	20	2.3	28	67
CSF012	-22.6667	-44.0333	66	2,0	30	2.9	15	45
CSF014	-22.7661	-43.6542	270	5,0	100	2.9	22	66
CSF015	-22.8356	-43.7131	120	3.4	34	2.4	20	49
CSF017	-22.3500	-43.5333	80	1.8	43	2.8	14	40
CSF018	-22.5333	-44.1333	70	5,0	18	2.4	27	66
CSF020	-22.4299	-43.5695	76	5,0	30	3,0	10	32
CSF021	-22.0495	-43.2080	100	3.2	25	3,0	9	26
CSF022	-22.0109	-43.3351	176	4,0	50	3,0	16	48

Onde ID representa a identificação do poço, long. e lat. são as coordenadas geográficas (SAD69), z a profundidade do poço medida em metros, ΔT são as variações de temperatura calculadas pelo sinal climático medidos em ºC, IM são as idades das mudanças climáticas calculadas medidas em anos, λ a condutividade térmica medida em W/K.m, Γ o gradiente geotérmico medido em ºC/km e Q o fluxo de calor medido na superfície (mW/m²).

Como exemplo da modelagem, os poços CSF005, CSF012, CSF014 e CSF017 e seus resultados são ilustrados na Figura 5, sendo as variações das mudanças climáticas recentes calculadas para estes de: 4°C / 50 anos, 2°C / 30 anos, 5°C / 100 anos e 1,8°C / 43 anos, respectivamente.

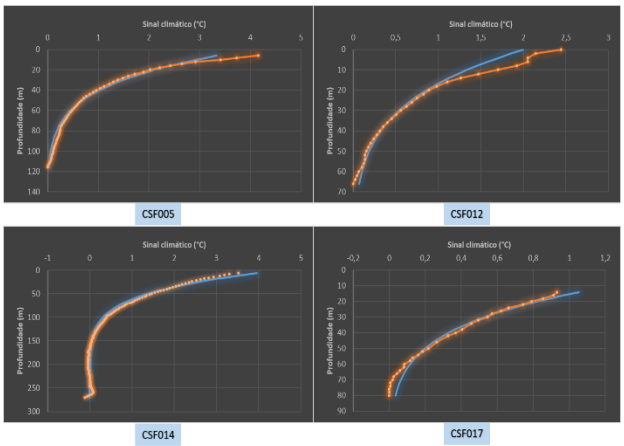

Figura 5 – Gráficos ilustrativos da modelagem do sinal climático utilizados no estudo aplicados nos poços CSF005, CSF012, CSF014 e CSF017.

A condutividade térmica média da região calculada a partir das informações dos litotipos dos poços utilizados, revelam uma variação de 3 a >4 W/Km na região que envolvem os municípios de Angra dos Reis, Niterói e Miguel Pereira e de 1,5 a 3 W/Km nas demais regiões. Os resultados estão ilustrados na Figura 6.

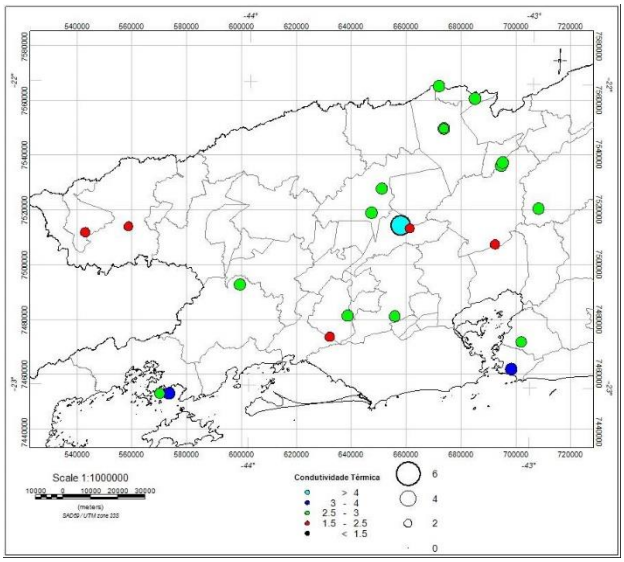

Figura 6 – Distribuição da condutividade térmica média calculada sobre diferentes litotipos descritos nos poços.

O fluxo de calor foi calculado por meio do gradiente geotérmico corrigido das variações diurnas, ou seja, gradiente geotérmico profundo multiplicado ao valor da

condutividade térmica média. Os resultados estão ilustrados na Figura 7.

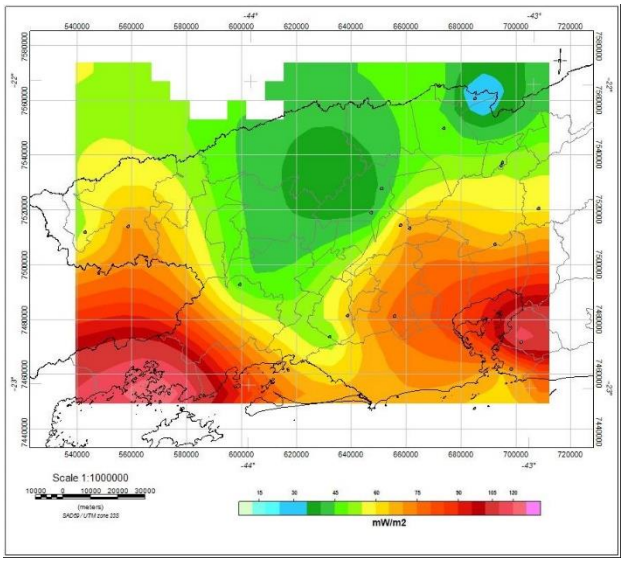

Figura 7 – Distribuição do fluxo de calor na região centro-sul fluminense.

A variação do fluxo geotérmico na região centro-sul fluminense é de é 55 a 75 mW/m², o que indica que na região sul ocorre uma dissipação de calor que na região central. Esses valores classifica a região como de média a baixa entalpia (Muffer & Cataldi, 1978). Todos os mapas de distribuição geofísica foram construídos utilizando a técnica de interpolação kgrid, no software Oasis Montaj, da Sequeent.

Discussão e Conclusões

As maiores variações climáticas estão concentradas no sul fluminense e alguns aspectos geológicos podem estar atrelados a essas variações. A geologia no estado do Rio de Janeiro pode-se resumir granitoides, gnaisses e sedimentos aluviais (areia e argila). Alguns poços utilizados na pesquisa, estão próximos a zonas de contatos ou zonas de cisalhamento, essas descontinuidades podem provocar perda de calor interno e, portanto, sinais maiores para a variação e fluxo de calor, enquanto corpos hídricos próximos podem influenciar para sinais adiabáticos.

Atividades tectônicas também provocam mais calor – alta entalpia – ou seja, os poços próximos a Faixa Ribeira apresentaram sinais mais elevados. Regiões de moderada ou muita sedimentação apresentam uma condutividade térmica maior. Sedimentos por serem mais porosos possuem elevada taxa de variação térmica, enquanto rochas maciças são mais eficientes em reter mais calor.

Contudo, meios sólidos conduzem calor por convecção e essas rochas mais cristalinas terão graus maiores que 3°C num espaço de tempo até 30 anos. Ademais aos contatos e descontinuidades geológicas, não é possível explicar toda a significativa variação climática apenas pela geologia.

Questões antropológicas podem também estarem associadas, como por exemplo: regiões serranas apontaram baixo fluxo, ainda sim, apresentando uma variação considerável de temperatura na superfície que pode estar atrelado a diminuição da vegetação nos últimos anos e crescimento de zonas urbanas. Minas ativas, rodovias e estradas de ferro próximas aos poços também causam influência no sinal climático medido.

As principais conclusões da modelagem direta das variações climáticas são:

1. O aquecimento climático ocorreu em quase todas as localidades investigadas;
2. As magnitudes das mudanças climáticas estão na faixa de 3°C no modelo de variação linear;
3. As idades das mudanças climáticas se encontram entre 15 e 45 anos para o modelo utilizado;
4. Há indícios que as perturbações climáticas foram induzidas por mudanças na vegetação e uso do solo, além de um contraste topográfico que envolve a região;
5. Apesar da baixa densidade de dados é possível elaborar mapas em escala regional das mudanças climáticas e aferir sobre fenômenos como efeito estufa;
6. A região centro-sul fluminense apresenta característica de media a baixa entalpia, ou seja, baixa amostragem de manifestação de calor em superfície e exploração energética.

Agradecimentos

Agradecemos ao LabGeot - Observatório Nacional, pela disponibilização dos dados geotérmicos utilizados nesta pesquisa. Agradeço a Dra. Profª. Suze Nei Pereira Guimarães por todo o apoio e orientação que tornou possível a realização deste trabalho.

Referências

Birch, F., 1948. The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients, Am. J. Sci., Nº 246, p729–760.

Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C., 1959. Condution of Heat in Solids. Oxford at the cleredom press, London.

Dantas, M. E., Moraes, J. M., Ferrassoli, M. A., Jorge, M. D. Q., Hilquias, V. A. 2020. Geodiversidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, CPRM.32p.

Guimarães, S. N. P., Prado, E. M. G., Vieira, F. P., Lacasse, C. M., da Silva Rocha, N., de Jesus, B. L., de Souza Filho, O. A. 2022. Updated mapping of terrestrial heat flow in Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 113, 103627.

Hamza, V. M., 2007. Variação Climática Secular e Mapeamento do 'Efeito Estufa' no Território Brasileiro. In 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2007, Rio de Janeiro, Brazil, 19-23 November 2007 (pp. 386-391). Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.

Heilbron, M., Eirado, L. G., Almeida, J. C. H. 2016. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro. Belo Horizonte: CPRM. Escala 1:400.000.

Programa Geologia do Brasil. Mapas Geológicos Estaduais.

Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, 7(2-4), 53-89.

Lanchenbruch, A. H., Sass, J. H., Marshall, B. V.,1986. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Artic: Science, Vol. 234, Nº 7, p689-696. November.