

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉRMICA DA CROSTA SUPERIOR DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

Juliana de Oliveira Batista¹
Carlos Henrique Alexandrino²
Carlos Alberto Mirez Tarrillo³

Resumo: A região da porção norte do Cráton São Francisco e parte sul da Província Borborema, onde está localizada a Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco, apresenta alterações geotectônicas devido aos processos colisionais sofridos em suas formações, podendo ser apto a calor crustal utilizável. Este artigo apresenta a caracterização geotérmica da crosta superior da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco, identificando alvos geotérmicos através da associação da geologia e da geofísica, com intuito de localizar fontes passíveis de uso da energia geotérmica. Foi constatado que ao longo de 10Km de profundidade a temperatura vai de 20 a 441°C e o calor entre 1 a 67GJ, com prevalência de calor de muito baixa e de baixa entalpia.

Palavras-chave: Geotermia. Energia geotérmica. Submédio São Francisco. Cráton São Francisco. Província Borborema.

GEOHERMAL CHARACTERIZATION OF THE UPPER CRUST OF THE SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO HYDROGRAPHIC BASIN

Abstract: The region of the northern portion of the São Francisco Craton and the southern part of the Borborema Province, where the Hydrographic Basin of the Submédio São Francisco is located, presents geotectonic alterations due to the collisional processes suffered in its formations, being capable of having usable crustal heat. This article presents geothermal characterization of the upper crust of the Hydrographic Basin of the Submédio São Francisco, identifying geothermal targets through the association of geology and geophysics, in order to locate sources that can be used geothermal energy. It was found that over 10km of depth the temperature ranges from 20 to 441°C and the heat between 1 to 67GJ, with a prevalence of very low and low enthalpy heat.

Keywords: Geothermal. Geothermal energy. Submédio São Francisco. São Francisco Cratons. Borborema Province.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉRMICA DE LA PARTE SUPERIOR DE LA CORTEZA TERRESTRE DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

Resumen: La región de la parte norte del Cratón São Francisco y la parte sur de la Provincia Borborema, donde se encuentra la Cuenca Hidrográfica del Submédio São Francisco, presenta alteraciones geotectónicas debido a los procesos de colisión sufridos en sus formaciones, pudiendo ser posible tener el calor de la corteza terrestre

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, engenheirajulianabatista@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>

² Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, carlos.alexandrino@ufvjm.edu.br, <https://orcid.org/0000-0001-9408-4644>

³ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM, ICET, Teófilo Otoni, Brasil, carlos.mirez@ufvjm.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-3024-915X>

utilizable. Este artículo presenta la caracterización geotérmica de la parte superior de la corteza terrestre de la Cuenca Hidrográfica del Submédio São Francisco, identificando objetivos geotérmicos mediante la asociación de geología y geofísica, con el fin de localizar fuentes capaces de utilizar energía geotérmica. Encuentra que hasta 10km de profundidad la temperatura oscila entre 20 y 441°C y el calor entre 1 y 67GJ, con predominio de muy bajo calor y baja entalpía.

Palabras clave: Geotermia. Energía geotérmica. Submédio São Francisco. Cratón de São Francisco. Provincia Borborema.

Introdução

A determinação do calor crustal em uma localidade é imprescindível para indicar a ocorrência de reservatórios geotermiais, dos quais possuem propriedades susceptíveis de uso da energia geotérmica, tal geração pode servir como opção estratégica para locais com problemas ambientais que interferem nas matrizes energéticas convencionais, como combustíveis fósseis ou hidroelétricas (ARBOIT *et al.*, 2013). Locais que sofreram ações divergentes, convergentes e transformantes da tectônica podem ser passíveis de calor crustal utilizável.

A região da porção norte do Cráton São Francisco e parte sul da Província Borborema, onde está localizado o Submédio São Francisco, apresenta alterações geotectônicas devido aos processos colisionais sofridos em suas formações (DE SÁ *et al.*, 1992). Presumivelmente a localidade pode apresentar evoluções dinâmicas que favoreçam o calor crustal em pequenas superfícies.

Segundo Neto *et al.* (2013) este território se destaca por sua estrutura econômica e social, além de possuir sérios problemas referentes à distribuição de água, causando intermitência em alguns pontos do rio, provocando problemas de distribuição de água em algumas localidades e acarretando efeitos nocivos na economia e no bem-estar social, como a geração de energia. Dessa forma, é necessário encontrar soluções energéticas eficazes à região.

Este artigo apresenta a caracterização geotérmica da litosfera da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco, identificando alvos geotérmicos através da associação da geologia e da geofísica, com intuito de mapear o campo térmico da crosta superior estimando a temperatura crustal a fim de localizar fontes passíveis de uso da energia geotérmica. Com esse intuito foi caracterizada sua litosfera através de

dados geológicos dos poços hídricos, dimensionado o calor mediante a concentração de sílica dos poços e criado mapas do campo térmico da crosta superior.

O Submédio São Francisco

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco possui cerca de 640000km² de extensão territorial, responsável por 7,5% da área de drenagem do país. Possui seis estados (Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás) e o Distrito Federal, totalizando 507 municípios. Devido à sua vastidão, possui quatro subdivisões fisiográficas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Submédio São Francisco e Baixo São Francisco (CBHSF, 2016).

O Submédio São Francisco vai do trecho oeste de Pernambuco à fração norte da Bahia, com uma área de 125755km²; é considerado uma das regiões com extrema importância no Nordeste por ser o maior polo de fruticultura tropical do país (SÁ *et al.*, 2009).

Situa na porção norte do Cráton São Francisco e parte sul da Província Borborema, separadas pelo Cinturão Riacho do Pontal e Cinturão Sergipano (DE SÁ *et al.*, 1992), apresenta deformações estruturais em consequência da colisão do Cráton São Francisco e a Província Borborema durante o ciclo brasileiro, com empurrões e nappes vergentes ao Cráton, ademais, de algumas zonas de sutura e terrenos transcorrentes.

Soares (2013) declara que os problemas de distribuição de água acontecem por alguns meses do ano devido à predominância do clima semiárido e temperatura média anual entre 23°C a 27°C. Baseados nos últimos 50 anos, a evaporação média anual é de 2000mm/ano e possui um dos menores índices pluviométricos do país, com importe médio de 500mm (SILVA, 2000). De Assis *et al.* (2018) afirma que a irregularidade da precipitação acontece devido às anomalias de temperatura de superfície do mar, desta forma, no *El Niño* a redução dos ventos de convecção fazem que a frente fria não avance, ocorrendo aumento de temperatura do oceano e diminuição das chuvas, sobretudo nos meses de dezembro e janeiro. Já em fases de *La Niña* ocorre um acréscimo de ventos frios e mais densos, decrescendo a temperatura do oceano e elevando o índice pluviométrico médio. Esses fatores fazem

que uma boa parte dos rios efluentes desta subdivisão da Bacia Hidrográfica sejam intermitentes, causando a interrupção da geração de energia pelas hidroelétricas por alguns períodos do ano (NETO *et al.*, 2013).

Estudo geofísico

A geotermia tem papel significativo em variados fenômenos planetários, internos e externos, dos quais dependerão de fatores das rochas como condutividade térmica, gradiente geotérmico, fluxo de calor e outros (ALEXANDRINO, 2008).

Em situações não laboratoriais a condutividade poderá ser dimensionada de acordo com análises do perfil dos poços. Neste caso é possível utilizar as quantias da condutividade térmica de inúmeras rochas já verificadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Condutividade termal conforme litologia	
Litotipo	Condutividade termal ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Ardósia ¹	2,2
Areia ³	1,38
Arenito ²	2,8
Arenito fino ²	4,1
Arenito ² médio/grosso ²	4,7
Argila ⁵	1,6
Argilito ²	2,7
Calcário ²	2,7
Filito ⁴	2,8
Folhelho ²	1,9
Gnaisse ⁴	2,4
Granito ⁴	2,3

Granodiorito ⁴	3,1
Mármore ⁴	3,2
Metabasalto ⁴	3,2
Micaxisto ²	2,7
Quartzito ⁴	4
Silte ³	1,07
Siltito ²	2,6
Solo ⁵	0,73
Xisto ⁴	3,9

Fonte: 1 - De Andrade Queiroz e De Melo (2019), 2 - Pereira e Hamza (1991), 3 - Schön (2011), 4 - Vitorello, Hamza e Pollack (1980), 5 - Yang (2017).

De acordo com Alexandrino (2008), o conhecimento de aspectos físico-químicos do interior da Terra através de estudos geoquímicos, como a concentração de sílica nas rochas, propicia calcular a temperatura do poço pelo método de correlação entre os elementos químicos contidos na água com suas propriedades térmicas. Esse método geoquímico (GCL) pode estimar o valor da temperatura em poços que contém até 199,8ppm de sílica com as Equações 1 e 2, adaptadas por Alexandrino e Hamza (2018) a partir das obras de Fournier e Rowe (1966), Truesdell (1976) e Fournier (1977), onde SiO_2 é a concentração de sílica em ppm e T_{SiO_2} é a temperatura do reservatório em °C.

Para montia entre 6,1ppm a 47,4ppm será usada a Equação 1:

$$T_{\text{SiO}_2} = -41,85 + 0,33 * \text{SiO}_2 - 0,00067 * (\text{SiO}_2)^2 + 33,09 * \ln(\text{SiO}_2) \quad (1)$$

Para quantia entre 47,4ppm a 199,8ppm é utilizada a Equação 2:

$$T_{\text{SiO}_2} = -52,28 + 0,20 * \text{SiO}_2 - 0,00011 * (\text{SiO}_2)^2 + 37,04 * \ln(\text{SiO}_2) \quad (2)$$

Kearey, Brooks e Hill (2013) esclarece que o gradiente térmico é caracterizado como o calor transmitido ao longo da litologia, oscilando de acordo com sua composição e a variação de temperatura entre a rocha e a superfície. Conforme Alexandrino e Hamza (2018) o gradiente térmico pode ser calculado com a equação da Lei de Fourier (EQ. 3), onde $\frac{dT}{dz}$ é o gradiente térmico em °C/Km, T_{sup} é temperatura média superficial em °C, m é o coeficiente angular de $1071 \pm 125^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ e λ é a condutividade térmica em W/mK.

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{T_{\text{SiO}_2} - T_{\text{sup}}}{m\lambda} \quad (3)$$

De acordo com Alexandrino e Hamza (2018) o fluxo de calor pode ser calculado com a Equação 4 da Lei de Fourier, onde q é o fluxo de calor em mW/m².

$$q = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (4)$$

Para estimar se uma localidade possui capacidade de fornecer recurso geotérmico útil e viável economicamente é preciso avaliar o excesso de temperatura fornecido em cada profundidade (ALEXANDRINO, 2008). O procedimento que possui melhor adaptabilidade é o método volumétrico descrito por Muffler e Cataldi (1978), do qual considera o volume de rocha e de água para estimar a quantia de energia termal disponível conforme a profundidade a partir da Equação 5, onde ΔT é o excesso de temperatura (em °C), A é a contribuição radiogênica (em W/m³) sendo adotado $2,1 \cdot 10^{-6}$ para a Borborema e $2,3 \cdot 10^{-6}$ para o São Francisco, D é o decréscimo logarítmico da produção de calor (em m) sendo usado $11 \cdot 10^3\text{m}$, e z é a profundidade estudada (em m).

$$\Delta T = \frac{AD^2}{\lambda} \left(1 - \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \right) + \frac{(q_0 - AD)}{\lambda} z \quad (5)$$

Seguindo o método volumétrico disposto por Muffler e Cataldi (1978) a temperatura consoante a profundidade poderá ser dimensionada com a Equação 6, onde T é a temperatura na crustal (em °C).

$$T = \Delta T - T_{sup} \quad (6)$$

Williams, Reed e Anderson (2011) alegam que a energia geotérmica pode ser classificada segundo a temperatura local, sendo a de alta entalpia maior que 150°C, de entalpia moderada entre 90 a 150°C e de baixa entalpia menor que 90°C. Omido, Barboza e Júnior (2017) classificam temperaturas abaixo de 30°C como uma energia geotérmica de muito baixa entalpia.

A energia útil advinda desse excesso de temperatura na crosta terrestre, conhecida como recurso base geotermal, pode ser estimada para comparação de viabilidade econômica com outros recursos energéticos (ALEXANDRINO, 2008). Muffler e Cataldi (1978) declaram que esse calor pode ser mensurado pelo método volumétrico (EQ. 7), onde Q_{RB} é o recurso base termal (em EJ), ρ é a densidade média da crosta superior (2650kg/m³), C_p é a capacidade térmica volumétrica (836J/kg/°C), S é a razão entre a área total pela quantidade de poços utilizados (1,06.10⁹m²), d é a profundidade média da crosta (40.10³m) definida por Uieda e Barbosa (2017).

$$Q_{RB} = \rho \cdot C_p \cdot S \cdot d \cdot \Delta T \quad (7)$$

Gomes (2009) esclarece que para a variação da temperatura estar em consonância com a profundidade, necessita que a quantia do excesso de temperatura seja integrada, transformando a estimativa na Equação 8.

$$Q_{RB} = \rho \cdot C_p \cdot S \cdot d \cdot \left(\frac{q \cdot z^2}{2\lambda} - \frac{A \cdot z^3}{6\lambda} \right) \quad (8)$$

Para dimensionamento do recurso base por unidade de área (Q_{RBUA} , em GJ) pode utilizar a Equação 9, onde A_{total} é a área total estudada (29889.10⁶ m²).

$$Q_{RBUA} = \frac{Q_{RB}}{A_{total}} \quad (9)$$

Muffler e Cataldi (1978) evidenciam que tecnologias mais avançadas conseguem extrair um pequeno percentual dessa energia térmica com auxílio de fluidos, entre 10 a 25%, por consequência das propriedades estruturais das rochas e do fluido extrator do calor, como exemplo os sistemas hidrotérmicos em que 90% do calor ficarão contidos na rocha e 10% serão absorvidos pela água. Contudo, apesar de seu baixo rendimento, ainda é propícia à utilização da energia geotérmica no Brasil, sejam em pequenas ou grandes profundezas, pois, poderá otimizar os gastos na geração de energia elétrica convencional.

Materiais e métodos

Para determinação do perfil geotérmico da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco foi efetuado um levantamento de dados em sistemas governamentais e em estudos já publicados. A demarcação do território, as alterações geotectônicas e importantes informações litológicas foram angariadas no Catálogo de Geoserviços do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística versão 2.13.2 (GEOSERVER, 2019) em arquivos com formato shapefile. Os elementos alfanuméricos e geográficos dos poços estudados foram adquiridos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), pertencente ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) (CPRM, 2014); estes foram escolhidos pelos que possuem informes da litologia e concentração de sílica na água, obtendo 119 poços compatíveis, dos quais todos estão distribuídos de modo não uniforme, porém, abrangendo quase a totalidade do espaço. Os conhecimentos sobre localização e profundidade foram alcançados pela função pesquisa geral da mesma plataforma através da geração de relatório em formato de planilha xls, já os dados sobre litologia e concentração de sílica foram captados pela extração individual na página de informações de cada poço. A temperatura média da superfície de cada poço foi retirada do mapa de espacialização

da temperatura do ar anual normal sobre a Bacia do Submédio São Francisco confeccionado por De Moura *et al.* (2006).

Para aquisição da condutividade termal de cada poço foi realizada a interpretação litológica de cada camada através da média ponderada dos valores da condutividade térmica de cada litotipo encontrado na Tabela 1 e sua respectiva espessura. A concentração de sílica obtida foi utilizada para dimensionar a temperatura no fundo do poço através das Equações 1 e 2 do método geoquímico (GCL), baseado no texto de Alexandrino e Hamza (2018). Para calcular o gradiente térmico foi empregada a Lei de Fourier (Equação 3). O Produto do gradiente geotérmico com a condutividade térmica foi aplicado para diagnosticar o fluxo de calor através da Equação 4 da Lei de Fourier. Com o método volumétrico descrito por Muffler e Cataldi (1978) tornou possível a estima do excesso de temperatura usando a Equação 5. Para o excesso de temperatura foi manuseada a Equação 6 para definir a temperatura crustal em profundidades entre 1 a 10Km. A classificação da temperatura crustal aconteceu a partir de sua entalpia de acordo com definições de Williams, Reed e Anderson (2011) e Omido, Barboza e Júnior (2017). A energia que poderá ser extraída do território de estudo foi calculada usando a Equação 8 através do método volumétrico de Muffler e Cataldi (1978) adaptada por Gomes (2009). Para o dimensionamento do recurso base por unidade de área foi recorrido à Equação 9. A quantidade de calor extraído neste local foi determinada por 10% da quantia do recurso base termal, tendo como cenário a retirada de calor utilizando água como fluido absorvente.

Todos os dados alfanuméricos angariados foram salvos em planilha do *software* Microsoft Excel (EXCEL, 2019) no formato csv e agregados juntamente às informações em formato shapefile nos *softwares* Qgis versão 3.14 - Pi (QGIS, 2020) e Surfer versão 18.1.186 (SURFER, 2020), sendo todos georreferenciados utilizando o Sistema de Coordenadas Geográficas Datum SIRGAS 2000. A manipulação destes deu origem aos mapas de alterações geotectônicas, gradiente geotérmico, fluxo de calor, temperatura crustal e recurso base termal recuperável por unidade de área, todos em formato png.

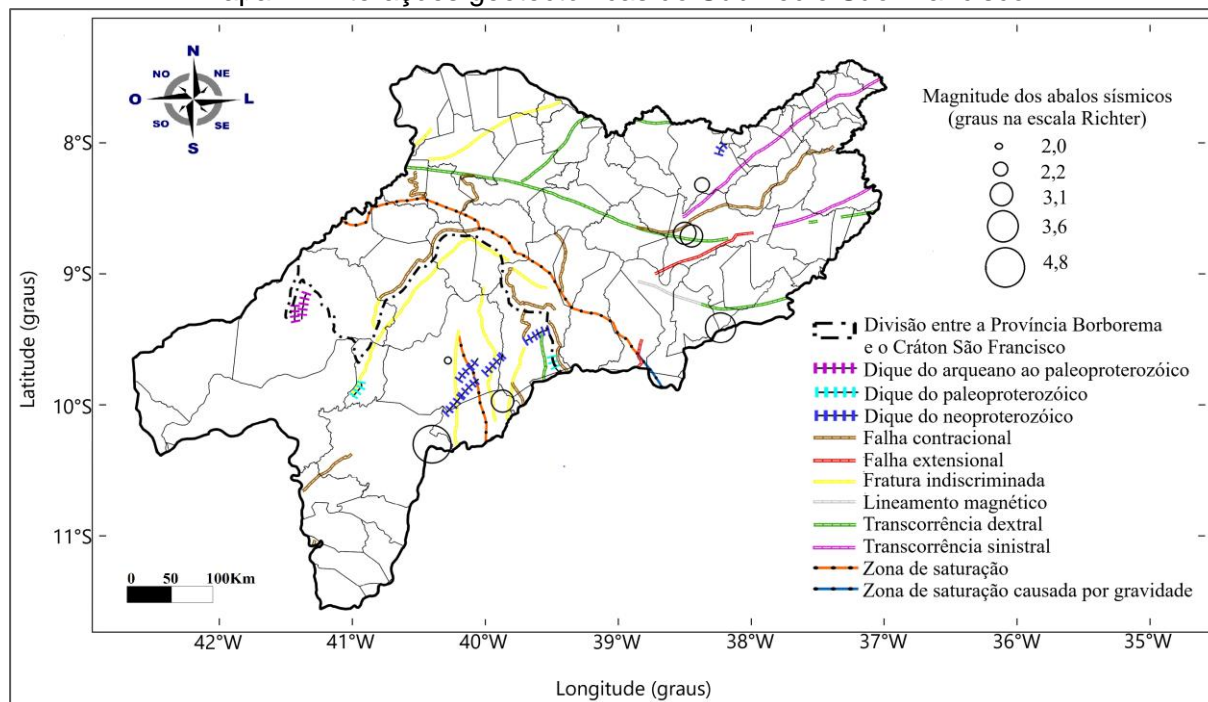
Resultados

Conforme o tempo geológico das estruturas pré-cambrianas e fanerozóicas desta região na Província Borborema há predominância de setores consolidados antes e depois do neoproterozóico, com pequenas extensões alicerçadas de antes do paleozoico, do jurássico e antes do cretáceo, de depois do cretáceo e do quaternário. Já no Cráton São Francisco é identificado metamorfismo intenso com grandes aparições de formações de antes do arqueano, antes do paleoproterozóico, depois do mesoproterozóico, depois neoproterozóico e do quaternário, também apresenta pequenas porções de depois do arqueano, antes do orosiano e antes do neoproterozóico.

As unidades tectônicas da litologia do Submédio São Francisco mostram que a Província Borborema encontra em domínio de processos orogênicos de médio grau, arcos continentais magmáticos e rifts relacionados ao embasamento, existindo singelas aparições de embasamento intracratônico, magmatismos, arcos plutônicos, arcos da ilha, ofiolita e crosta superficial não consolidada. No Cráton São Francisco há preeminência de embasamento intracratônico, crosta superficial não consolidada e áreas plutônicas, ademais, breves ocorrências de arco continental magmático, *greenstone*, ofiolita e arco da ilha.

No Mapa 1 de alterações geotectônicas é notada que a Província Borborema é cortada por zona de saturação, transcorrências dextral e sinistral, falhas contracional e extencional, fratura indiscriminada, lineamento magnético, zona de saturação gravimétrica e anomalias sísmicas de 2,2 graus, 3,1 graus e 3,6 graus na escala Richter. A interface das estruturas Borborema/São Francisco é dominada por diques que vão do arqueano ao paleoproterozóico, do neoproterozóico e do paleoproterozóico, falha contracional, fratura indiscriminada e transcorrência dextral. Na região cratônica existe falha contracional, fratura indiscriminada, diques do neoproterozóico e paleoproterozóico, zona de saturação e anomalias sísmicas de 2 graus, de 3,6 graus e de 4,8 na escala Richter.

Mapa 1 - Alterações geotectônicas do Submédio São Francisco



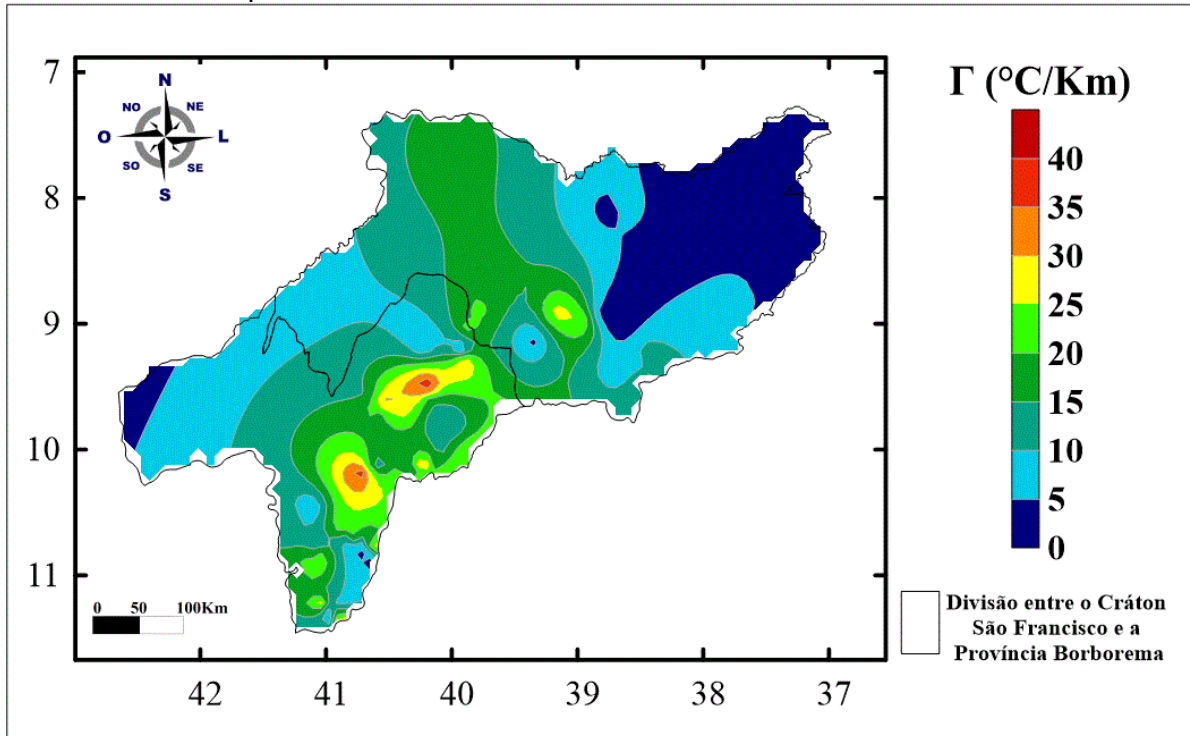
Fonte: Do próprio autor.

O estudo da condutividade térmica das rochas do Submédio evidencia a predominância de sumas entre 2W/mK e $3,5\text{W/mK}$ tanto no Cráton São Francisco quanto na Província Borborema, tais quantias ocorrem devido à presença de ardósia, areia, arenito, argila, argilito, calcário, filito, folhelho, gnaisses, granito, micaxisto, quartzito, quartzos, siltito e xisto. Condutividade abaixo de 2W/mK é encontrada em locais com rochas cristalinas fragmentadas. Já condutividades maiores que $3,5\text{W/mK}$ estão relacionadas às regiões com grande presença de quartzos e arenitos.

A distribuição do gradiente geotérmico é avistada no Mapa 2. Na Província Borborema o gradiente predominante está em 0 a 20°C/Km ; a porção nordeste e entre Abaré, Chorrochó e Curaçá possui importes entre 0 a 5°C/Km , entre as cidades ao norte está de 15 a 20°C/Km , é encontrado entre Abaré, Chorrochó e Macururé variando de 15 a 30°C/Km . No limite entre o Cráton São Francisco e a Província Borborema o gradiente predominante varia entre 5 a 20°C/Km ; são somente vistos entre 20 a 25°C/Km entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista. No Cráton São Francisco o gradiente médio vai de 5 a 20°C/Km ; pequenos focos de 0 a 5°C/Km são encontrados entre Pilão Arcado e Remanso e entre Jacobina e Mirangaba, montantes entre 5 a 30°C/Km são vistos em Mirangaba, Jaguarari e entre Morro do Chapéu,

Ourolândia e Várzea Nova, importes mais altos, entre 5 a 40°C/Km, estão em Campo Formoso e Juazeiro.

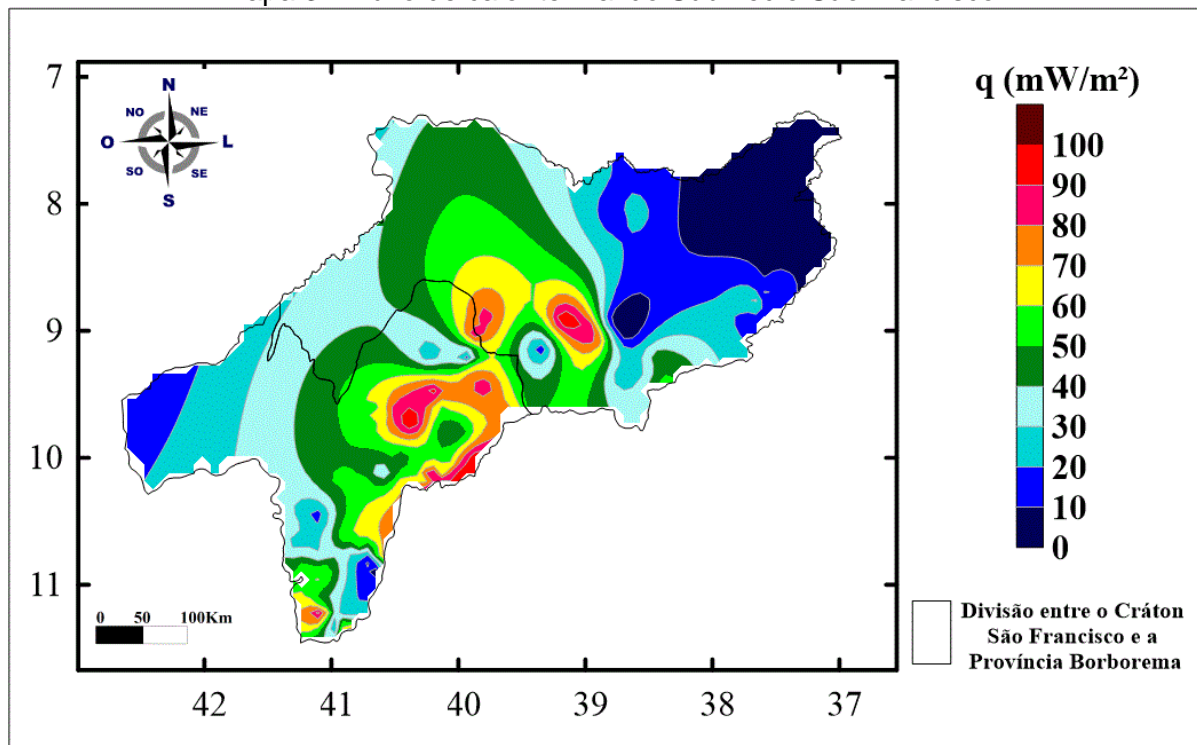
Mapa 2 - Gradiente Geotérmico do Submédio São Francisco



Fonte: Do próprio autor.

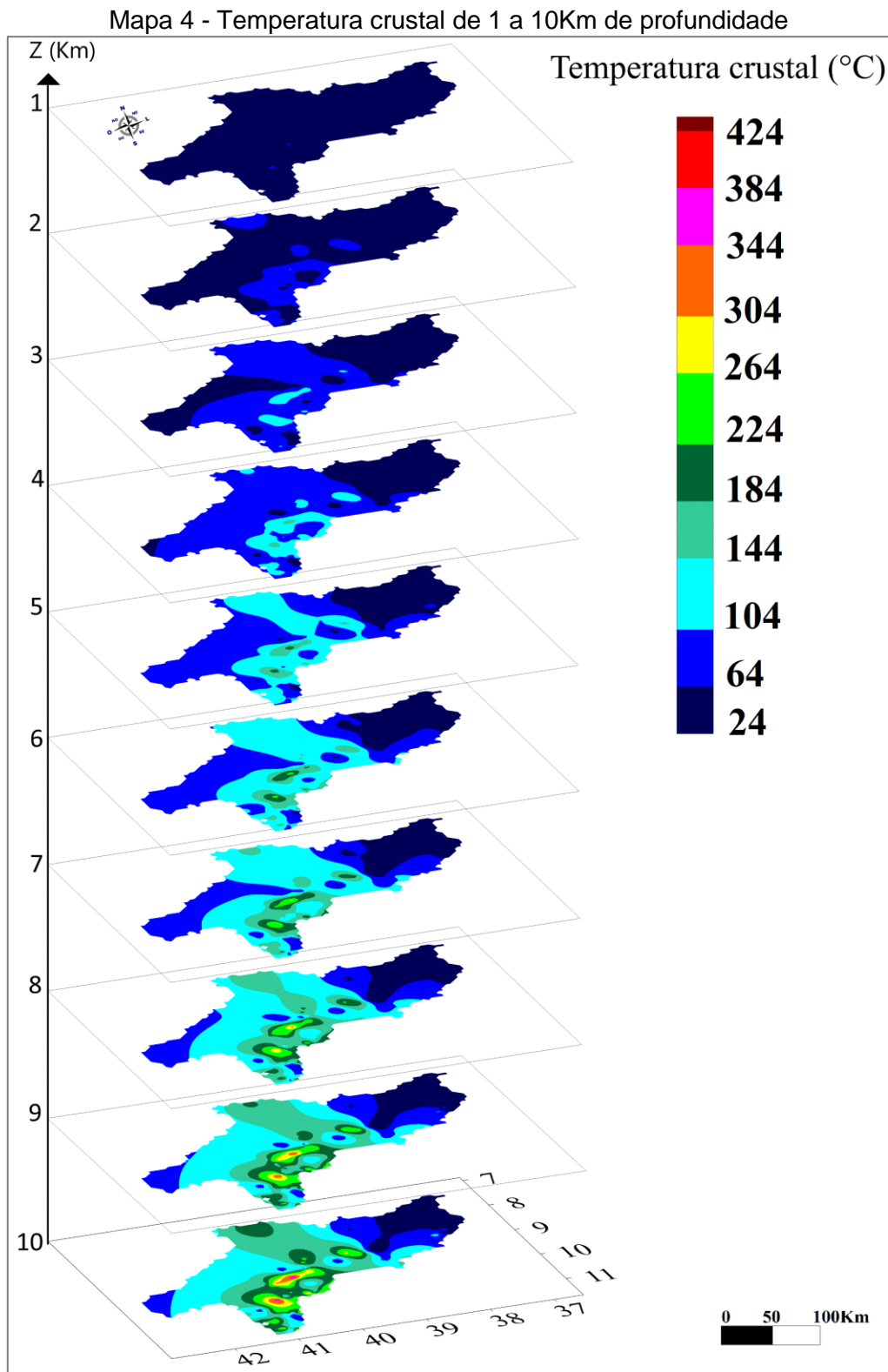
O arranjo do fluxo geotérmico (Mapa 3) em toda região indica que na Província Borborema há dominância de 0 a 40mW/m²; quantia de 0 a 30mW/m² em sua porção nordeste e entre Abaré, Chorrochó e Curaçá, nas cidades ao norte está de 30 a 70mW/m², variações de 60 a 100mW/m² estão localizadas em Abaré, Chorrochó e Macururé. Na divisão entre o Cráton São Francisco e a Província Borborema, nos municípios de Curaçá e Santa Maria da Boa Vista está entre 50 a 90mW/m. O fluxo dominante no Cráton São Francisco é de 20 a 60mW/m²; monta entre 0 a 10mW/m² encontra entre Pilão Arcado e Remanso e entre Jacobina e Mirangaba, em Campo Formoso está de 20 a 80mW/m², vai de 20 a 100mW/m² em Juazeiro e entre Morro do Chapéu, Ourolândia e Várzea Nova, já em Jaguarari o fluxo é encontrado de 40 a 100mW/m².

Mapa 3 - Fluxo de calor termal do Submédio São Francisco



Fonte: Do próprio autor.

A temperatura crustal média predominante da região entre 1 a 10Km de profundidade visto no Mapa 4 está entre 20 a 441°C. Em 1Km de profundidade toda extensão possui média menor que 40°C. O valor médio em 2Km é 56°C, em Mirangaba, entre Bodocó e Ipubi, entre Santa Maria da Boa Vista e Curaçá, entre Abaré, Chorrochó e Macururé, entre Jaguarari e Uauá e entre Morro do Chapéu e Ourolândia vai de 56 a 80°C, chegando entre 186 a 302°C com 10Km. O destaque vai para Campo Formoso e entre Juazeiro e Curaçá alcança 108°C com 2Km, percebendo a variação até 441°C em 10Km.



Fonte: Do próprio autor.

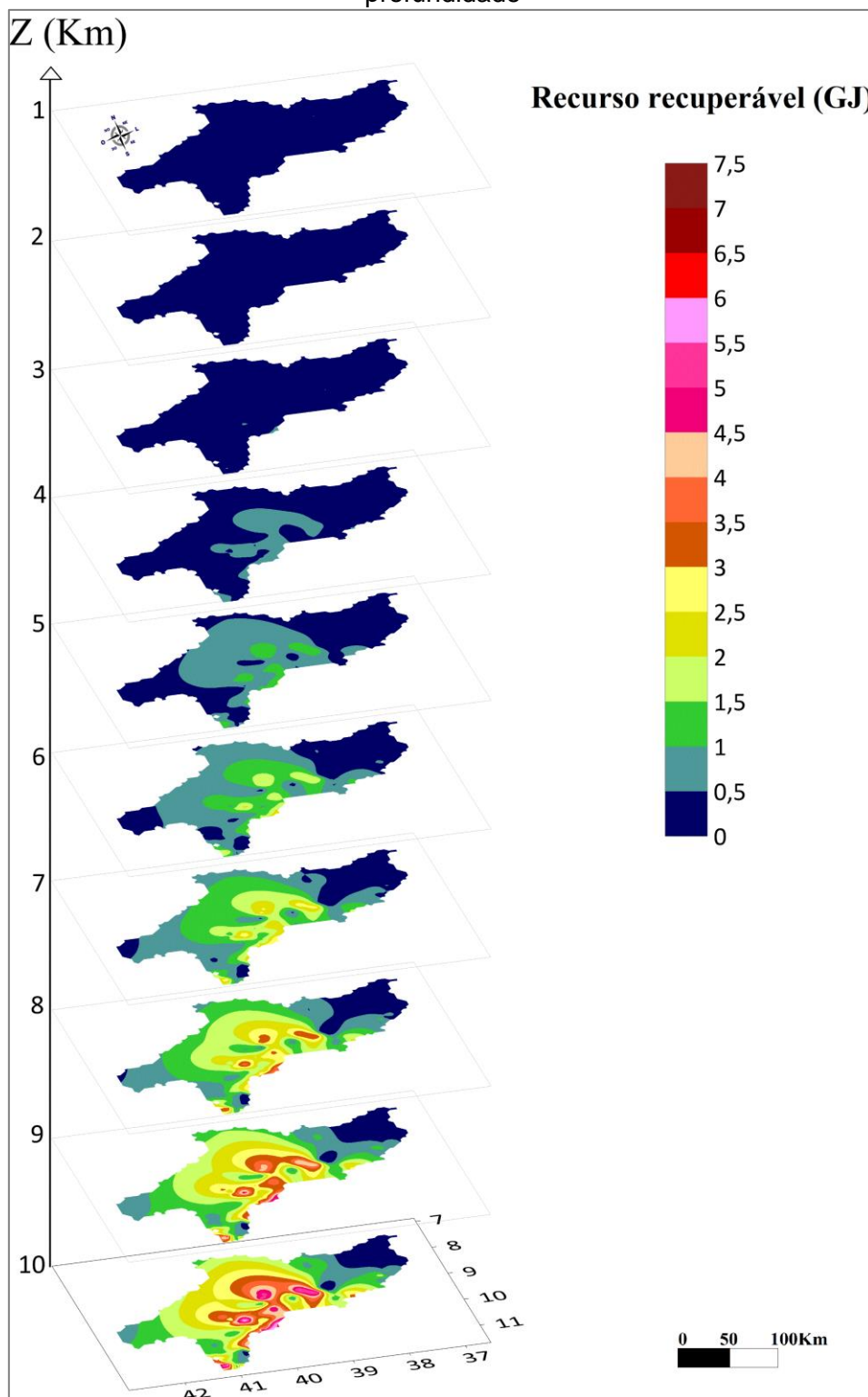
Ao longo de 10Km de profundidade a classificação da temperatura que prevalece no Submédio São Francisco varia entre calor de muito baixa a baixa

entalpia, sendo que o montante de baixa entalpia expande da região central para norte e noroeste, além disso, são percebidas aparições de moderada a alta entalpia nos municípios de Juazeiro, entre Campo Formoso e Mirangaba, entre Jaguarari e Uauá, entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista, entre Abaré, Chorrochó e Macururé, entre Ipubi e Bodocó e entre Morro do Chapéu, Ouroândia e Várzea Nova.

O recurso base termal por unidade de área médio predominante ao longo de 10Km de profundidade varia entre 1 a 27GJ. Em profundidade entre 1 a 2Km somente é possível encontrar montas menores que 1GJ. A partir de 3Km valores acima 2,4GJ estão em torno de Campo Formoso, Uauá, entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista e entre Abaré, Chorrochó e Macururé; tais cidades também se destacam até 10Km, indo de 26,9 a 58,7GJ. O destaque vai para Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu com quantidade até 67GJ.

O recurso base termal recuperável por unidade de área (Mapa 5) médio dominante do Submédio São Francisco está entre 0 e 3GJ. Nos primeiros 3Km de profundidade o valor não atinge 0,5GJ. Somente os municípios de Campo Formoso, Uauá, entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista e entre Abaré, Chorrochó e Macururé atingem montas de 0,5GJ até 5,9GJ, de 4 a 10Km respectivamente. Já em Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu as quantias entre 4 a 10Km vão de 0,5 a 6,7GJ.

Mapa 5 - Recurso base termal recuperável por unidade de área de 1 a 10Km de profundidade



Fonte: Do próprio autor.

Discussões

Os estudos apresentados para o Submédio São Francisco evidenciaram novas características geotérmicas da região, das quais estão ligadas ao metamorfismo geológico e tectônico sofridos ao decorrer do tempo.

Os estudos geológicos evidenciam que a maior transformação desta parte da Província Borborema é vista à noroeste com formações de depois do neoproterozóico até o quaternário, entre as cidades de Ipubi e Bodocó. Também é indicado que as falhas, fraturas, transcorrências e lineamentos coincidem com os locais modificados desde o neoproterozóico, entre as cidades de Curaçá, Lagoa Grande, Petrolina e Santa Maria da Boa Vista, das quais incidem de nordeste da Província Borborema empurrando estruturas mais antigas para sudeste do Cráton São Francisco. Esse fato também foi notabilizado por De Sá *et al.* (1992), afirmando que esses nappes externos da Faixa Sergipana foram empurrados da Borborema por 30 a 40Km sobre o cristalino na região da cidade de Curaçá, localizada na linha limítrofe das províncias, com uma transcorrência dextral devido às forças cisalhantes deste processo.

A Província Borborema aparenta estar mais consolidada do que a parcela cratônica, pois, apresenta ao decorrer de 10Km de profundidade baixa a moderada entalpia, possivelmente devido à sua litologia densa causada por napeamentos. Presumivelmente as forças desses nappes causaram em seu entorno algumas zonas frágeis com aparecimento de linhas de ruptura e afinamento da crosta, propiciando locais com médias a altas geotermias. Tal indício vai de encontro com afirmações feitas por Silva (1999) sobre as deformações sedimentares superficiais contidas pelo soerguimento da pluma do manto na formação do Cinturão Sergipano.

É presumido que energia de muito baixa entalpia e menor que 1GJ de pode ser recolhida em todo o Submédio a partir de 1Km de profundidade; ao decorrer dos 10Km é percebido esse calor estreitar sua localização, podendo ser encontrada à noroeste e à sudeste, porém amplia a energia em até 6,7GJ. Singelas aparições de baixa entalpia com calor menor que 1GJ pode ser captado a 2Km de profundidade em Campo Formoso e Juazeiro, atinge 6GJ em 3Km em torno de Abaré, Campo Formoso, Chorochó, Curaçá, Jaguarari, Juazeiro, Macururé, Morro do Chapéu, Santa Maria da

Boa Vista e Uauá, e a partir deste momento é iniciada sua expansão nas direções norte, noroeste e sudeste até alcançar em torno de 27GJ até 10Km.

Ademais, foram localizadas pequenas porções de calores de moderada entalpia começando a aparecer em 3Km de profundidade na cidade de Campo Formoso, com 4GJ de energia, e em Juazeiro, com até 6GJ. Entre 4 a 5Km atinge entre 6,7 a 14,7GJ em Campo Formoso e Chorrochó, chegando até 16,7GJ em Jaguarari e Juazeiro. A partir de 6Km expande em torno dos municípios de Juazeiro, entre Campo Formoso e Mirangaba, entre Jaguarari e Uauá, entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista, entre Abaré, Chorrochó e Macururé, entre Ipubi e Bodocó e entre Morro do Chapéu, Orolândia e Várzea Nova, alcançando 26,9GJ. Os calores de alta entalpia iniciam progressivamente a partir de 6Km de 9,7 a 21,1GJ em Campo Formoso e 24GJ em Juazeiro. De 8 a 10Km é presenciada uma tendência de união destas anomalias térmicas em Juazeiro, entre Campo Formoso e Mirangaba, entre Jaguarari e Uauá, entre Curaçá e Santa Maria da Boa Vista, entre Abaré, Chorrochó e Macururé e entre Morro do Chapéu, Orolândia e Várzea Nova, destacando Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu com quantidade até 67GJ.

A distribuição do recurso base termal recuperável por unidade de área de 1 a 10Km de profundidade vista deixa claro que em até 3Km de profundidade de todo o Submédio São Francisco não possui recurso recuperável atingindo 1GJ, provavelmente causado por interferência do calor com superfície. Entre 3 a 4Km os municípios de Abaré, Campo Formoso, Chorrochó, Curaçá, Jaguarari, Juazeiro, Macururé, Morro do Chapéu, Santa Maria da Boa Vista e Uauá possuem aproximadamente mesma quantia de recurso recuperável. Após 4Km as cidades de Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu possuem maior importe.

Comparações dos resultados térmicos e geológicos expõe que diferentemente do que se observa no restante do Submédio, foram encontrados valores atípicos de calor crustal na região cratônica franciscana, nas cidades de Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu, associando fluxo de calor atingindo 100mW/m², temperatura até 391°C, calor recuperável de 6,7GJ a 10Km de profundidade, alterações geotectônicas, litologia do quaternário e zonas de metamorfismo. Nota-se que anomalias de gradiente geotérmico e fluxo de calor estão ligadas à idade geológica e às alterações tectônicas, determinantes para altos importes de recurso termal por unidade de área.

A disponibilidade energética do Submédio São Francisco pode ser comparada a partir de usos cotidianos como para climatização residencial, aquecimento leve e processos secundários e primários de geração de energia elétrica, como sugeridos por Williams, Reed e Anderson (2011) e Omido, Barboza e Júnior (2017).

A distribuição do recurso base termal recuperável por unidade de área de 1 a 10Km de profundidade deixa claro que em até 3Km de profundidade de todo o Submédio São Francisco não possui recurso recuperável atingindo 1GJ, provavelmente causado por interferência do calor com a superfície ou com água. Entre 3 a 4Km os municípios de Abaré, Campo Formoso, Chorrochó, Curaçá, Jaguarari, Juazeiro, Macururé, Morro do Chapéu, Santa Maria da Boa Vista e Uauá possuem aproximadamente mesma quantia de recurso recuperável. Após 4Km as cidades de Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu possuem maior importe.

É presumido que altos recursos térmicos apresentados em Jaguarari e Juazeiro sejam ocasionados por processos orogênicos de alto grau associado com rochas plutônicas e crosta superficial não consolidada, apresentando granulitos, gnaisses e migmatitos; ademais, devido à fragilidade da litologia, graças à junção de uma fratura indiscriminada com uma zona de saturação e da aproximação de alguns diques do neoproterozóico, das quais geram anomalias sísmicas de 2,00 graus, 3,1 graus e 4,8 graus de magnitude Richter. É possível que nesta localidade a temperatura crustal é amenizada pela passagem do Rio São Francisco.

Apesar da extensão estudada da Província Borborema encontrar em domínio de inúmeras unidades tectônicas, sua estrutura aparenta estar mais consolidada do que a parcela cratônica franciscana, pois, apresenta ao decorrer de 10Km de profundidade baixa a moderada entalpia, possivelmente devido à sua litologia densa causada por napeamentos. Presumivelmente as forças desses nappes causaram em seu entorno algumas zonas frágeis com aparecimento de linhas de ruptura e afinamento da crosta, propiciando locais com médias a altas geotermias. Este indício vai de encontro com afirmações feitas por Silva (1999) sobre as deformações sedimentares superficiais contidas pelo soerguimento da pluma do manto na formação do Cinturão Sergipano.

Comparações dos resultados térmicos e geológicos expõe que diferentemente do que é observado no restante do Submédio, foram encontrados valores atípicos de

calor crustal na região cratônica franciscana, nas cidades de Jaguarari, Juazeiro e Morro do Chapéu, associando fluxo de calor atingindo 100mW/m^2 , temperatura até 441°C , calor recuperável de $6,7\text{GJ}$ a 10Km de profundidade, muitas alterações geotectônicas, litologia do quaternário e zonas de metamorfismo. É evidente que anomalias de gradiente geotérmico e fluxo de calor estão ligadas à idade geológica e às alterações tectônicas, determinantes para altos importes de recurso termal por unidade de área.

Considerações finais

Apesar de ser uma região com litoestratigrafia rebuscada, possui predominância de gradiente menor que 20°C/Km , fluxo inferior a 40mW/m^2 e geotermia de baixa a muito baixa entalpia ao decorrer de 10Km de profundidade, sendo valores típicos dessa localidade por motivo da idade e composição das rochas, validando com outros estudos realizados de tais fragmentos das províncias, como de Carneiro, Hamza e De Almeida (1989) e de Alexandrino (2008). Desta forma, é constatado que grande proporção de sua estrutura está consolidada por obra de processos orogênicos de médio grau, dos quais causaram maior espessura da crosta por agrupamento de camadas geológicas na junção destas províncias a partir da orogênese brasileira.

A análise em grupo dos resultados deixa evidente que ações transformantes durante importantes eventos geológicos encadearam na evolução estrutural que propicia altos índices geotérmicos em algumas localidades. A porção do Submédio São Francisco que possui maiores quantias de gradiente e fluxo térmico é compreendida pelo Cráton São Francisco, graças a sua estrutura com grande orogenia e aumento do fluxo de calor de acordo menor idade das rochas.

As análises dos mapas aqui apresentados mostram uma correlação entre alterações geotérmicas e as anomalias tectônicas, possibilitando vários usos da energia geotérmica no Submédio São Francisco, pois, ao longo de 10Km de profundidade a temperatura vai de 20 a 441°C com prevalência de calor de muito baixa entalpia para baixa entalpia, também sendo percebido calor de moderada a alta entalpia apenas em algumas cidades.

É recomendada captação de energia de muito baixa entalpia e menor que 1GJ a partir de 1Km de profundidade em toda a região, propícia para sistemas de climatização. Recolhimento de baixa entalpia com calor menor que 1GJ é indicado para usos diversos de leve aquecimento, tanto industriais ou residenciais; pode ser feito desde 2Km de profundidade nas cidades de Campo Formoso e Juazeiro e a começar de 3Km com 6GJ em torno de Abaré, Campo Formoso, Chorrochó, Curaçá, Jaguarari, Juazeiro, Macururé, Morro do Chapéu, Santa Maria da Boa Vista e Uauá. Moderada entalpia de até 6GJ é sugerida como processo secundário na geração de energia elétrica; deverá ser interceptada a contar de 3Km nas cidades de Campo Formoso e Juazeiro, a partir de 4Km com aproximadamente 7GJ em Chorrochó e Jaguarari e a iniciar de 6Km pode ser aproveitado com 26,9GJ em Abaré, Bodocó, Curaçá, Ipubi, Macururé, Mirangaba, Morro do Chapéu, Santa Maria da Boa Vista, Ouroândia, Uauá e Várzea Nova. Uso de calores de 21 a 24GJ e de alta entalpia pode ser usufruído como fonte principal de geração de energia elétrica; inicia progressivamente a partir de 6Km em Campo Formoso e Juazeiro, desde 8Km poderá ser absorvido com quantidade até 67GJ também em Abaré, Bodocó, Chorrochó, Curaçá, Ipubi, Jaguarari, Macururé, Mirangaba, Morro do Chapéu, Santa Maria da Boa Vista, Ouroândia, Uauá e Várzea Nova.

A maior economia no uso da energia geotérmica descrita pode ser gerada através do aproveitamento da água captada por poços profundos já instalados como principal fluido trocador de calor, não demandando outra perfuração, possuindo gastos somente com atualização da outorga de captação de água e instalação de tubulação para transporte do fluido.

Ademais, é evidente que o desenvolvimento de tecnologias que permitirão maior profundidade na perfuração da crosta beneficiará a utilização dos recursos geotérmicos nesses municípios, visto que chegam a valores acima de 441°C a 10km de profundidade.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRINO, C. H.. **Campo termal da província estrutural São Francisco e faixas móveis adjacentes**. Rio de Janeiro, 2008. 184 p. Tese (Geofísica) - Observatório Nacional.

ALEXANDRINO, C. H.; HAMZA, V. M.. Terrestrial Heat Flow in Non-thermal ground water circulation settings of Brazil. **International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics**, v. 1, n. 1, p. 46-51, 2018.

ARBOIT, N. K. S; DECEZARO, S. T.. Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil: uma revisão de literatura. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 26, p. 155, 2013.

CBHSF - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: RF3 - Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. 2016. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1ImKovRKxAFJP3jcWseFQ2j_fVpyhPJJf. Acesso em: 17 mar. 2020.

CPRM, SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. 2014. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br> Acesso em: 10 de Julho de 2019.

DE ANDRADE QUEIROZ, C.; DE MELO, A. B.. Caracterização das propriedades térmicas da pedra reconstituída com resíduos da extração de quartzito para aplicação em revestimento de fachadas de edifícios. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, 2019.

DE ASSIS, J. M. O.; DE SOUZA, W. M.; KOCH, H.; SOBRAL, M. D. C. M.. Influência dos oceanos pacífico e atlântico tropicais sobre os índices climáticos da precipitação na bacia do Submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 2018.

DE MOURA, M. S. B.; SÁ, I. I. S.; DA SILVA, T. G. F.; GALVÍNCIO, J. D.; RIBEIRO, J. G.. Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14. 2006, Florianópolis.

DE SÁ, E. F. J.; MACEDO, M. H.; FUCK, R. A.. Terrenos proterozóicos na Província Borborema e a margem norte do Cráton São Francisco. **Brazilian Journal of Geology**, p. 472-480. 1992.

EXCEL. *In*: **Microsoft Corporation**. versão 2019. [S. l.], 2019.

FOURNIER, R. O.. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. **Geothermics**, v. 5, n. 1-4, p. 41-50, 1977.

FOURNIER, R. O.; ROWE, J. J.. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. **American Journal of Science**, v. 264, n. 9, p. 685-697, 1966.

GEOSERVER, CATÁLOGO DE GEOSERVIÇOS DO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**. versão 2.13.2. Disponível em <https://geoservicos.ibge.gov.br/geoserver/web>. Acessado em: 02 de Dezembro de 2019.

- GOMES, A. J. L.. **Avaliação de Recursos Geotermiais da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro, 2009. Tese (Geofísica) - Observatório Nacional.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I.. **An Introduction to Geophysical Exploration**. John Wiley & Sons, v. 3, f. 136, 2013. 272 p.
- MUFFLER, P.; CATALDI, R.. **Methods for regional assessment of geothermal resources**, v. 7. 1978, p. 53-89.
- NETO, M. D. S.; ALMEIDA, W. D.; LINS JUNIOR, G. G.; NETO, N. D. N. A.. Importância estratégica do Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco no semiárido. *In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL SALVADOR/BAHIA*, IBEAS-Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2013. 25-28 p.
- OMIDO, A. R.; BARBOZA, C. S.; JÚNIOR, O. M.. Energia Geotérmica: Uma Aliada Na Busca Da Eficiência Energética. *In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL-CONGEA*. Campo Grande. 2017.
- PEREIRA, A. J. O.; HAMZA, V. M.. Fluxo geotérmico na bacia do Parnaíba (MA). *In: 2ND INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY*. European Association of Geoscientists & Engineers, 1991.
- SÁ, I. B.; SÁ, I. I. S.; SILVA, A. D. S.; DA SILVA, D. F.. Caracterização ambiental do Vale do Submédio São Francisco. *In: LIMA, M. A. C. D.; SÁ, I. B.; KIILL, L. H. P.; ARAÚJO, J. L. P.; BORGES, R. M. E.; LIMA NETO, F. P.; SOARES, J. M.; LEÃO, P. C. D. S.; SILVA, P. C. G. D.; CORREIA, R. C.; SILVA, A. D. S.; SÁ, I. I. S.; DA SILVA, D. F.. Subsídios técnicos para a indicação geográfica de procedência do Vale do Submédio São Francisco: uva de mesa e manga*. Embrapa Semiárido, 2009.
- SCHÖN, Jürgen. **Physical Properties of Rocks: A Workbook**: Handbook of Petroleum Exploration and Production. Elsevier, v. 8, 2011. 481 p.
- SILVA, S. M. P. D. A.. distribuição espacial das reservas hídricas subterrâneas do Nordeste e a transposição do Rio São Francisco. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, v. 5, 2000. p. 47-55.
- SILVA, L. J. H. D. E. R.. Basin infilling in the southern-central part of the Sergipano Belt (NE Brazil) and implications for the evolution of Pan-African/Brasiliano cratons and Neoproterozoic sedimentary cover. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 12, n. 5, p. 453-470, 1999.
- SOARES, E.. Seca no Nordeste e a transposição do Rio São Francisco. **Revista Geografias**, p. 75-86, 2013.
- SURFER. **Golden Software**. versão 18.1.186. 2020.
- QGIS. **QGIS Association**. versão 3.14.1-Pi. 2020.
- TRUEDELL, A. H.. Geochemical techniques in exploration. *In: PROCEEDINGS OF THE 2ND UNITED NATIONS SYMPOSIUM 482 ON THE DEVELOPMENT AND USE OF GEOTHERMAL RESOURCES*, San Francisco, 1976. 53-79 p.

UIEDA, L.; BARBOSA, V. C. F.. Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. **Geophysical Journal International**, v. 208, n. 1, p. 162-176, 2017.

VITORELLO, I.; HAMZA, V. M.; POLLACK, H. N.. Terrestrial Heat Flow in the Brazilian Highlands, **Journal of Geophysics Review**, vol. 85, pp. 3778- 3788, 1980.

WILLIAMS, C. F.; REED, M. J.; ANDERSON, A. F.. Updating the classification of geothermal resources. *In*: WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING. 2011.

YANG, S.; WEI, J.. **Fundamentals of Petrophysics**. Springer, v. 3, f. 251, 2017. 502 p.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Juliana de Oliveira Batista - Concepção. Coleta de dados, Análise de dados, Elaboração do manuscrito, revisão e aprovação da versão final do trabalho

Carlos Henrique Alexandrino—Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Carlos Alberto Mirez Tarrillo—Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Não se aplica.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 30-01-2021

Aprovado em: 22-08-2022