

Modelo crustal e fluxo de calor nos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé adjacentes às bordas emersas da Bacia Sergipe-Alagoas

Crustal model and heat flow in the Estância, Canudos-Vaza-Barris and Macururé domains bordering the emerged edge of Sergipe-Alagoas Basin

Roberto Max de Argollo | Moacyr Moura Marinho | Alexandre Barreto Costa | Heli de Almeida Sampaio Filho | Edilton José dos Santos | Luiz Felipe Carvalho Coutinho

resumo

Neste artigo, determinou-se o fluxo de calor em trechos da Bacia Sergipe-Alagoas usando modelos para sua crosta subjacente com base nos domínios geotectônicos que constituem o embasamento adjacente a essa bacia. Esse embasamento aflorante é constituído pelos domínios geotectônicos Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé, em uma faixa de cerca de 440km ao longo da costa oceânica e largura de 50km da borda emersa da bacia.

Foram visitados 1.483 afloramentos do embasamento e coletou-se 1.623 amostras de rocha das várias unidades geológicas presentes, nas quais determinou-se a massa específica, os teores de K, U e Th e a taxa volumétrica de produção de calor. Para calcular o fluxo de calor produzido em cada domínio, usou-se dados existentes para estimar a sua espessura e o seu substrato. Utilizou-se, também, modelos para obter a função $A(z)$ da variação vertical de produção de calor. Nesses modelos, assumiu-se ser o substrato composto por rochas do Cráton do São Francisco, as quais estão nas fácies anfíbolito

e granulito nos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris e na fácies granulito no Macururé.

Os resultados obtidos mostram que nas crostas dos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris a produção de calor deve-se quase totalmente às rochas cratônicas. Os fluxos geotérmicos médios de $66,9\text{mW m}^{-2}$, $63,1\text{mW m}^{-2}$ e $55,7\text{mW m}^{-2}$ obtidos para os domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé, respectivamente, mostram-se concordantes com valores publicados do fluxo geotérmico médio de campos de petróleo nos trechos da bacia onde esses domínios devem estar presentes. Essa concordância suporta a validade das hipóteses sobre a constituição do embasamento subjacente da bacia, bem como da composição litológica dos domínios aflorantes e de seus substratos.

Para explicar a alta discrepância entre os valores de fluxo geotérmico obtidos e publicados na borda norte do Domínio Macururé, sugeriu-se que esse domínio possa ser menos espesso em sua borda norte ou a unidade Rio Coruripe, que constitui sua borda, tenha uma composição crustal distinta daquela do Domínio Macururé.

Palavras-chave: produção de calor radiogênico em rochas | modelagem da crosta terrestre | fluxo geotérmico

abstract

We determine the heat flow in parts of the Sergipe-Alagoas Basin using models of the crust of the geotectonic domains that constitute the basement adjacent to the basin, which we assume to be present at the bottom of this. This basement is constituted by the Estância, Canudos-Vaza-Barris and Macururé domains in a strip of about 440km along the ocean coast and 50km wide from the edge of the onshore basin.

We visited 1.483 basement outcrops and collected 1.623 rock samples from the various geological units present in which we determine the mass density, the K, U and Th contents and the volumetric rate of heat production. To calculate the heat flow produced in each domain, we use published data to estimate its thickness and of its substrate and used models to achieve the function $A(z)$ of the vertical variation of heat production. In these models, we assume that the substrates is composed by rocks of the São Francisco Craton which are in amphibolite and granulite facies in the Estância and Vaza-Barris domains, and granulite facies in Macururé one.

The results show that in the crust of the Estância and Vaza-Barris domains, heat production is due almost entirely to the cratonic rocks. The average geothermal flows of 66.9mW m^{-2} , 63.1mW m^{-2} and 55.7mW m^{-2} obtained for the Estância, Vaza-Barris and Macururé domains, respectively, appear consistent with published average values of oil-fields heat flow in parts of the basin where these domains must be present. This agreement supports the validity of hypotheses about the constitution of the basement of the basin and on the lithological composition of the domains and their substrates.

To explain the high discrepancy between the values measured and published on the northern edge of the Macururé Domain, we suggest that this domain may be thinner in its northern edge, or the Rio Coruripe unit, which forms that border, has a crustal composition different from that of the Macururé Domain.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: radiogenic heat production in rocks | earth-crust modeling | earth heat flow

introdução

A produção de calor na terra deve-se, principalmente, ao calor gerado pela transformação da energia cinética das partículas emitidas e produzidas no decaimento radioativo dos radioisótopos naturais no processo de interação dessas partículas com o material terrestre. Esse calor é referido como calor radiogênico.

Na escala geológica de tempo, apenas os elementos potássio (K), urânio (U) e tório (Th) (elementos produtores de calor) ocorrem em abundância suficiente para que os radioisótopos deles decorrentes contribuam relevantemente para o fluxo de calor geotérmico. Mais de 98% do calor radiogênico gerado no interior da terra deve-se ao radioisótopo K^{40} e aos radioisótopos constituintes das séries naturais do U^{235} , U^{238} e Th^{232} . A produção de calor radiogênico é duas ordens de grandeza maior nas rochas da crosta que nas do manto. Contudo, apenas um quinto do calor radiogênico terrestre é gerado na crosta, devido ao maior volume do manto.

A produção desse calor na crosta é heterogênea, lateralmente contribuindo com um pequeno percentual para o fluxo de calor superficial em áreas de rochas básicas e até 70% em terrenos graníticos (Morgan, 1985).

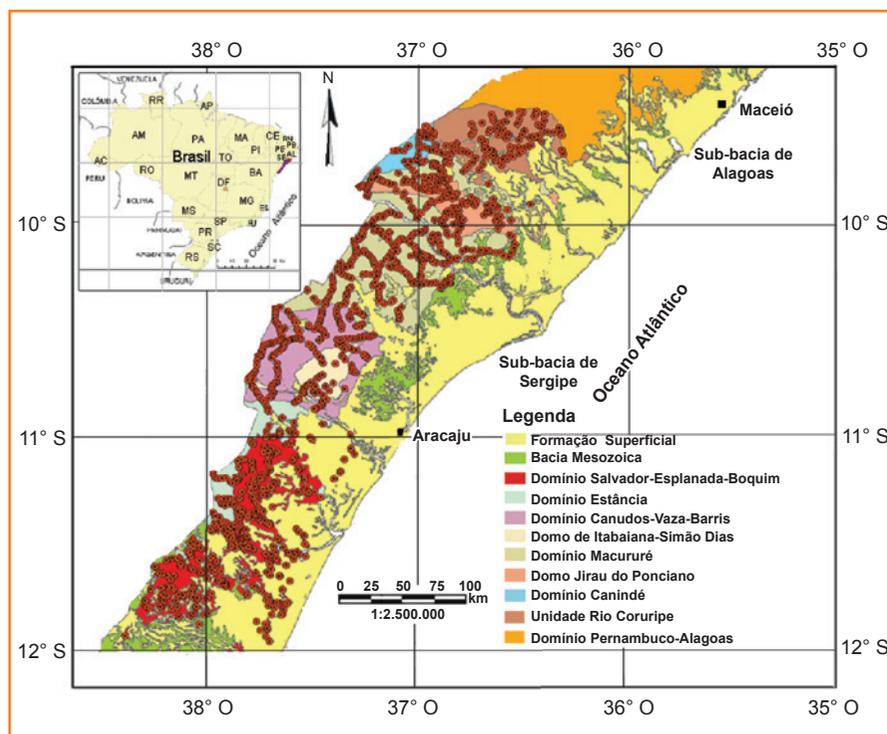
Verticalmente, a produção de calor crustal decresce com a profundidade, mas a forma desse decréscimo não é bem conhecida. Em algumas áreas específicas, denominadas de províncias de fluxo de calor, alguns autores (Birch *et al.*, 1968; Ashwal *et al.*, 1987) encontraram uma aparente relação linear entre o fluxo de calor na superfície (Q_o) e a geração de calor superficial (A_o) do tipo $Q_o = D A_o + Q_r$, onde D e Q_r são coeficientes que dependem dos terrenos. Lachenbruch (1970) mostrou que diferentes distribuições verticais da produção de calor podem conduzir a esta relação, desde uma distribuição homogênea em um bloco de espessura determinada até uma variação exponencial decrescente. Drury (1987), por outro lado, utilizou uma estimativa razoável de incerteza associada à análise dos valores de Q_r e D apresentados por outros autores, concluindo que o conceito de província de fluxo de calor é inválido, como exposto originalmente. O que se observa é que a dependência da taxa de produção de calor é, principalmente, ligada à litologia, o que foi demonstrado em estudos de poços superprofundos na Alemanha (9.101m) e na Rússia (12.262m), onde a taxa de produção de calor encontrada está relacionada, fundamentalmente, ao tipo litológico e não apenas à profundidade (Pribnow e Winter, 1997; Kremetsky e Ovchinnikov, 1986; Kremetsky *et al.*, 1989). Ashwal *et*

al. (1987), Reyes (2008) e Reyes et al. (2008) chegaram a conclusões semelhantes estudando perfis verticais da crosta exposta na superfície por tectonismo. Contudo, verifica-se que rochas crustais de origem mais profunda, tais como os granulitos e dioritos, possuem taxas mais baixas de produção de calor.

Para calcular-se o fluxo de calor Q produzido por um bloco de rocha precisa-se conhecer a função $A(z)$ de distribuição vertical à taxa de produção de calor. O problema é conhecer essa função. Da $A(z)$ sabe-se apenas que esta depende principalmente da litologia e que decresce com a profundidade, ainda que de modo não sistemático em regiões metamórficas (Ashwal et al., 1987). Alguns autores (Hawkesworth, 1974; Fountain e Salisbury, 1981; Nicolaysen et al., 1981; Schneider et al., 1987; Reyes, 2008); Reyes et al. (2008) têm obtido essa função estudando regiões nas quais uma seção vertical da crosta está exposta na superfície por tectonismo. Nesse caso, determina-se $A(z)$ diretamente em amostras extraídas dessas seções, quando existentes.

Em uma bacia, o calor radiogênico gerado pelas rochas do embasamento e pelas camadas sedimentares, somado ao calor proveniente da astenosfera, resulta no fluxo de calor superficial total. Esse fluxo desempenha um papel relevante na história térmica da bacia, sendo seu conhecimento importante para avaliar a geração de hidrocarbonetos. Essa avaliação, realizada por meio da modelagem termomecânica da bacia, requer o conhecimento da massa específica e das propriedades térmicas das rochas do embasamento e sedimentos das bacias como: a taxa volumétrica de produção de calor radiogênico, a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico (Mottaghy, 2005).

Neste artigo, construiu-se modelos de substratos e de distribuição vertical de produção de calor para os domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé no trecho adjacente à Bacia Sergipe-Alagoas, utilizando medidas geológicas e geofísicas em rochas coletadas na superfície. Usando esses modelos, calculou-se valores médios para o fluxo geotérmico nesses domínios e comparou-se aos valores médios publicados para campos petrolíferos no interior da bacia. Este trabalho insere-se no estudo mais geral desenvolvido no projeto Geoterm-Ne "Geração de calor nas bacias de Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba e nos embasamentos a elas adjacentes" do Programa Tecnológico de Exploração de Modelagem de Bacias (Promob) do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes), executado no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia (CPGG/UFBA).



área de estudo

A área de estudo deste trabalho situa-se no nordeste brasileiro e compreende uma faixa de 50km de largura e 440km de extensão do embasamento adjacente à borda emersa da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas, o qual inclui parte do Domínio Salvador-Esplanada-Boquim da subprovinça do Cráton do São Francisco e partes dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé da Faixa de Dobramentos Sergipana. A figura 1 mostra o mapa da área do embasamento estudado no qual são mostrados os pontos de afloramento visitados neste trabalho.

geologia regional da área de estudo

Província Borborema

O embasamento marginal à Bacia Sergipe-Alagoas inclui os domínios da Faixa Sergipana e o Domínio Pernambuco-Alagoas, os quais se inserem na Subprovinça Meridional da Província Borborema (fig. 2).

Figura 1

Mapa da área de estudo mostrando os pontos visitados. A área é uma faixa de 440km de extensão e 50km de largura margeando a borda emersa da Bacia Sergipe-Alagoas ao longo do litoral nordeste brasileiro.

Figure 1

Map of the study area showing the visited points. The area is a strip 440km long and width of 50km bordering the emerged edge of Sergipe-Alagoas Basin along the northeast coast of Brazil.

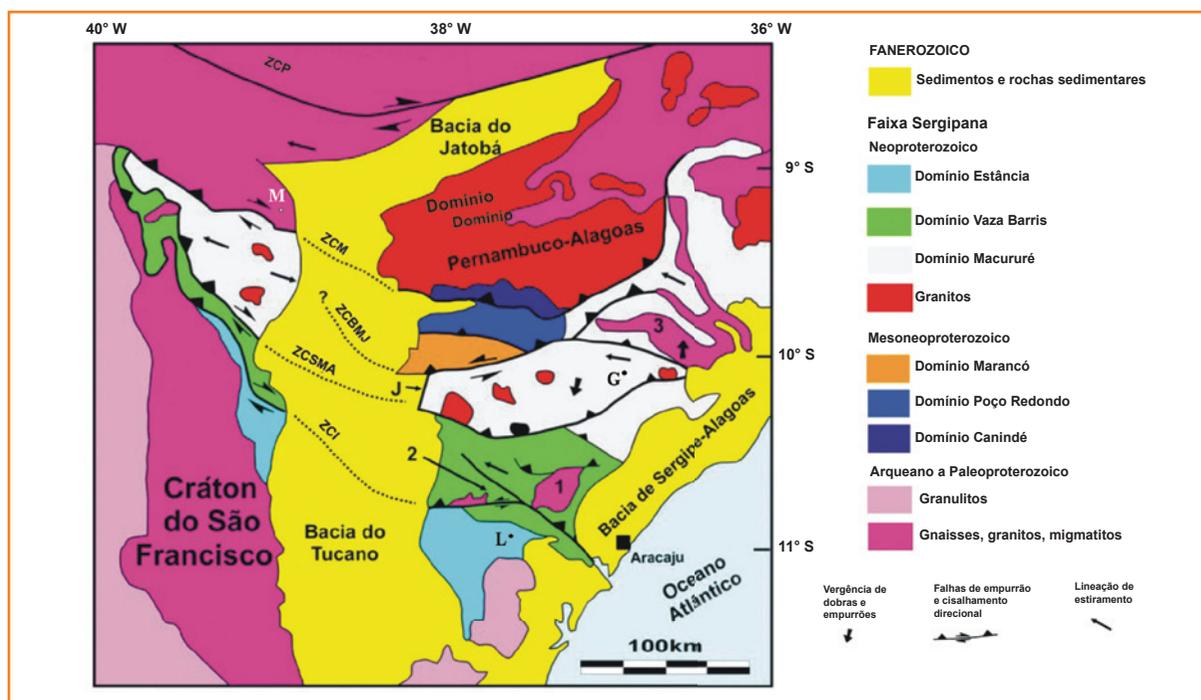


Figura 3
Compartimentação da Faixa Sergipana em domínios litotectônicos. As siglas ZCI, ZCSMA, ZCBMJ, ZCM e ZCP representam, respectivamente, as zonas de cisalhamento Itaporanga, São Miguel do Aleixo, Belo Monte-Jeremoabo, Macururé e Pernambuco. 1, 2 e 3 indicam os domos de Itabaiana, Simão Dias e Jirau do Ponciano, respectivamente. Cidades indicadas: (M) Macururé, (G) Graccho Cardoso e (L) Lagarto.

Figure 3
The Sergipano Belt partition into six lithotectonic domains. ZCI, ZCSMA, ZCBMJ, ZCM e ZCP represent, respectively, the Itaporanga, São Miguel do Aleixo, Belo Monte-Jeremoabo, Macururé and Pernambuco shear zones. 1, 2 and 3 indicate the Itabaiana, Simão Dias e Jirau do Ponciano domes. Cities indicated: (M) Macururé, (G) Graccho Cardoso e (L) Lagarto.

reduzido ao pólo (Oliveira, 2008). Essas interpretações evidenciam que os domínios da Faixa Sergipana – pelo menos alguns deles – devem constituir parte do embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas, juntamente com o Domínio Pernambuco-Alagoas, este mais ao norte.

Oliveira *et al.* (2010) propuseram um modelo de evolução tectônica da Faixa Sergipana, pelo qual o processo evolutivo começou com a quebra de um continente Paleoproterozoico e concluiu em 605-540 Ma com a compartimentação dos atuais domínios. Pelo modelo daqueles autores, o Cráton do São Francisco está na base dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé. A conclusão semelhante chegaram Santos (1988) e D'el-Rey Silva (1992, 1995b, 1999). Para estes autores, os três domínios referidos acima formam uma cunha contínua desenvolvida sobre a margem da antiga Placa São Francisco.

A área de estudo deste trabalho inclui os domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris, Macururé, os quais devem constituir o embasamento de parte da Bacia Sergipe-Alagoas. Uma estratigrafia sumária desses três domínios é mostrada na figura 4 (modificada de D'el-Rey Silva, 1999). Na figura, indicou-se, entre parênteses, estimativas das espessuras das formações geológicas dos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris, bem como do Domínio Macururé, baseadas nos trabalhos de Davison e Santos (1989), Santos *et al.* (1999), D'el-Rey Silva (1999) e Oliveira *et al.* (2001b).

O Domínio Estância representa a parte mais meridional da Faixa de Dobramentos Sergipana. Ele é

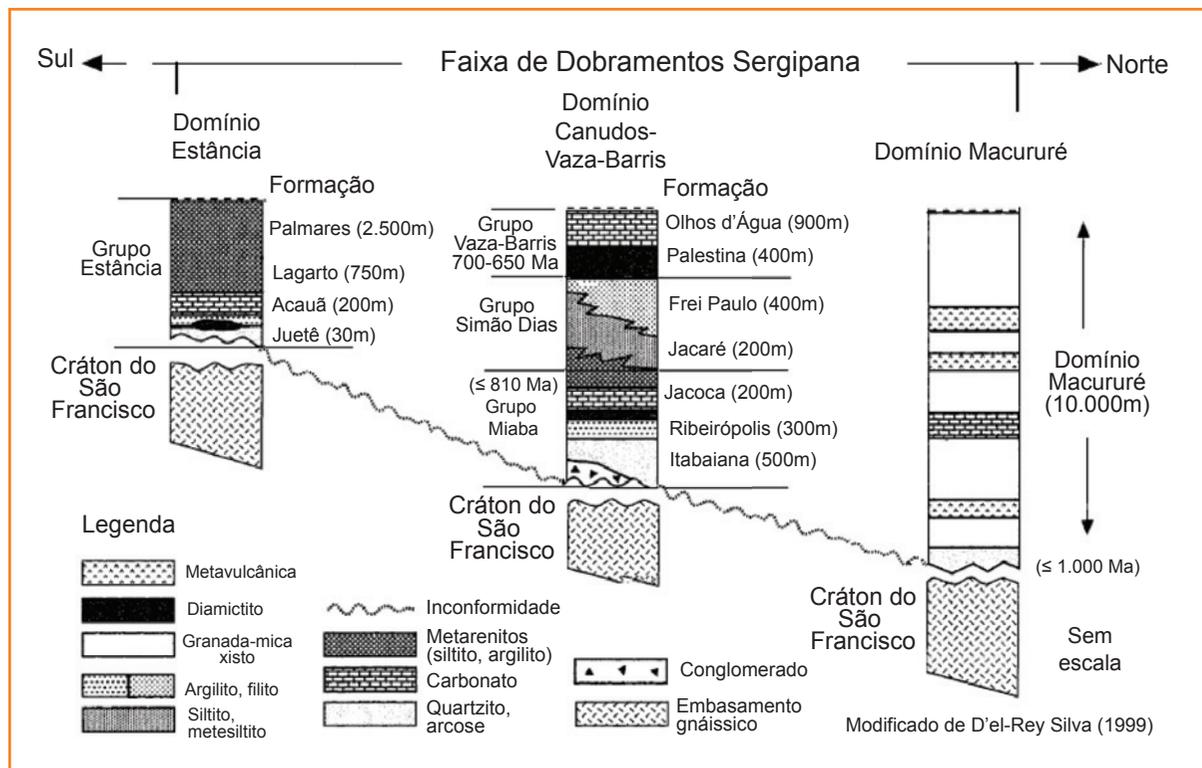
composto pelos sedimentos plataformais anquimeta-mórficos do grupo homônimo, representado pelos conglomerados, arenitos e argilitos da Formação Juetê, metacarbonatos da Formação Acauã, arenitos e argilitos da Formação Lagarto e arenitos e lentes de conglomerados da Formação Palmares, depositados na borda nordeste do Cráton do São Francisco em não conformidade sobre rochas gnáissicas do substrato cratônico (Fig.4). Esse domínio é raso e considerado uma região de baixo metamorfismo no processo de dobramentos. Seus sedimentos são fracamente deformados e segundo Brito Neves *et al.* (1977), Dominguez (1993) e Oliveira *et al.* (2010), as formações mais superiores do Grupo Estância, principalmente a Formação Palmares, foram depositadas em um antepaís na margem passiva do cráton. Na região, o cráton aflora tanto na fácies anfibolito quanto na granulito no norte da Bahia e no sul de Sergipe e, provavelmente, na base desse domínio.

O Domínio Canudos-Vaza-Barris é mais deformado que o Domínio Estância. Ele compreende: o Grupo Miaba, constituído de quartzitos e conglomerados da Formação Itabaiana, metagrauvacas, micaxistos e filitos siltosos da Formação Ribeirópolis e metacarbonatos da Formação Jacoca; o Grupo Simão Dias, constituído de metassiltitos da Formação Jacaré e micaxistos, metarenitos impuros e filitos siltosos da Formação Frei Paulo e o Grupo Vaza-Barris, constituído de diamictitos e filitos da Formação Palestina e metacarbonatos da Formação Olhos d'Água (fig.4).

Figura 4

Estratigrafia sumária da área dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé, modificada de D'el-Rey Silva (1999). Medidas entre parênteses são estimativas das espessuras das formações geológicas dos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris como também do Domínio Macururé baseadas nos trabalhos de Davison e Santos, 1989; Santos *et al.*, 1999; D'el-Rey Silva, 1999 e Oliveira *et al.*, 2001b.

Figure 4
Summary stratigraphy of the area of the Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé domains, modified from D'el-Rey Silva (1999). Measurements in brackets are estimates of the thickness of the geological formations of the Estância and Canudos-Vaza-Barris as also as of the Macururé Domain based on Davison and Santos 1989, Santos *et al.*, 1999; D'el-Rey Silva, 1999 and Oliveira *et al.*, 2001b.



Esse domínio repousa em não conformidade sobre as rochas do domo de Itabaiana-Simão Dias, que afloram na fácies anfibolito, de idade arqueana (Oliveira *et al.*, 2010). Esse domo tem sido estudado por vários autores (D'el-Rey Silva, 1995a; Oliveira *et al.*, 2010, Reginaldo Alves dos Santos, geólogo da CPRM, comunicação verbal), concluindo que o domo assenta-se no Cráton do São Francisco. Essa visão comporta a interpretação de que as rochas que constituem o substrato do Domínio Canudos-Vaza-Barris são semelhantes as do cráton que afloram no sul da Faixa Sergipana nas fácies anfibolito e granulito.

Na base, o Domínio Macururé é constituído pelo grupo homônimo composto pela Formação Santa Cruz, sobreposta por uma sequência de micaxistos granadíferos, metarritmitos e metagrauvacas, com lentes de quartzitos e intercalações muito subordinadas de mármore, rochas máficas/ultramáficas e rochas calcissilicáticas (fig. 4). Este grupo é atravessado por diversos corpos graníticos intrusivos pré a sin-colisionais. O Domínio Macururé assenta-se na Formação Santa Cruz, cuja espessura é estimada entre 200m e 300m (Oliveira, 2010), a qual, por sua vez, assenta-se nas rochas do Domo Jirau do Ponciano. Esse domo, segundo D'el Rey Silva (1999), Oliveira *et al.* (2010) e Reginaldo Alves dos Santos (comunicação verbal), assenta-se no Cráton do São Francisco.

metodologia

A amostragem das rochas neste trabalho foi feita em afloramentos do embasamento nas regiões de estudo da Bahia, Sergipe e Alagoas. A definição do número de afloramentos a serem visitados levou em consideração a relação (em porcentagem) entre a área de cada unidade geológica analisada e a área de cada região de estudo. Foram visitados 1.483 afloramentos cujas localções estão mostradas na figura 1. Nos afloramentos, realizaram-se descrições litológicas e descreveram-se os aspectos macroscópicos como coloração, textura, minerais e classificação da rocha, bem como os elementos tectonoestruturais de cada unidade envolvendo S planos e L linhas, eixos de dobras e muitos outros que permitiram resgatar parte do processo evolutivo da geologia local e compreender a evolução em escala regional. Foram coletadas amostras de rocha em cada afloramento para análise em laboratório (um tipo de rocha ou mais de um tipo quando existiam outras litologias relevantes). No apoio à diferenciação de litologias, foram determinados os teores dos elementos K, U e Th por espectrometria gama nas rochas aflorantes, utilizando um espectrômetro gama portátil, modelo GS-512 da Geofisika, dotado de um detector de cintilação de INa(Tl) de 76,2mm x 76,2mm.

Foram coletadas 1.624 amostras – nenhuma amostra foi coletada em regiões de intemperismo acentuado – e, no laboratório, foi determinada a densidade em cada uma delas com um picnômetro, para o qual o desvio relativo da medida é da ordem de 0,2% e os teores de K, U e Th foram determinados por espectrometria gama, usando detectores de cintilação de INa(Tl) de 102mm de diâmetro e 76mm de altura instalados em castelos de chumbo. Com esses resultados, foi calculada a taxa de produção volumétrica de calor A das amostras usando a expressão (Rybach, 1986):

$$A = 10^{-5} \rho (3,48 T_K + 9,52 T_U + 2,56 T_{Th}) \quad (1)$$

Onde:

- ρ = massa específica da rocha em $kg\ m^{-3}$;
- T_K = teor de potássio na amostra (dado em %);
- T_U e T_{Th} = teores de urânio e de tório em ppm respectivamente, obtendo-se A em $\mu W\ m^{-3}$.

resultados e discussão

Com os valores da massa específica e dos teores de K, U e Th determinados no laboratório, foi calculada a taxa volumétrica de produção de calor das amostras usando a equação 1. Na figura 5, apresentam-se as faixas de variação dessa taxa para os vários litotipos estudados. A observação dessas faixas mostra que elas são bastante largas para uma mesma litologia e se superpõem a várias litologias. Esse comportamento, já observado por vários autores (Ashwal *et al.*, 1987, entre outros), mostra não ser possível associar valores medidos dessa grandeza a uma litologia específica. Os valores médios da taxa volumétrica de produção de calor para as principais litologias estudadas são mostrados na figura 6. Essa taxa apresenta médias maiores no monzonito, granito-gnaiss, granito e sienito e médias menores no gabro, quartzito e arenito.

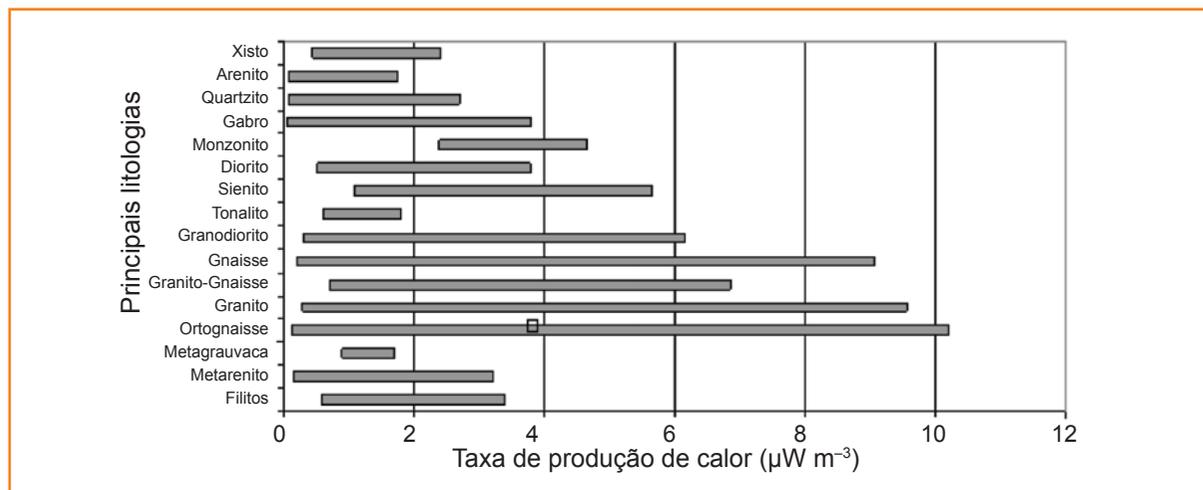


Figura 5

Faixa de variação da taxa de produção de calor nas principais litologias estudadas. Observa-se que as faixas são bastante largas para uma mesma litologia e se superpõem para as várias litologias.

Figure 5

Variation range of the heat production rate in the main lithologies studied. It is observed that the bands are quite wide for a same lithology and they overlap to the various lithologies.

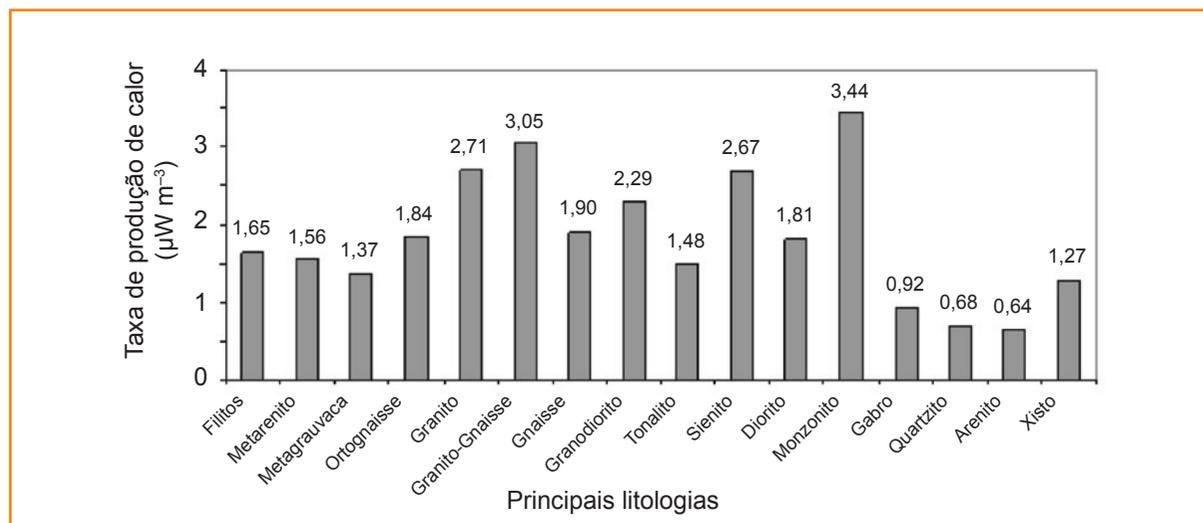


Figura 6

Valores médios da taxa de produção de calor obtidos com as amostras das principais litologias estudadas.

Figure 6

Mean values of the heat production rate obtained with the samples of the main studied lithologies.

A figura 7 apresenta o mapa de distribuição de isovalores da taxa volumétrica de produção de calor de amostras coletadas na superfície das áreas estudadas dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé, que devem constituir o embasamento de parte da Bacia Sergipe-Alagoas. Observa-se, na figura, que a maior produção de calor superficial está no sul da área, devido às rochas do Domínio

Salvador-Esplanada Boquim e na parte norte, onde afloram os corpos graníticos. A produção de calor é baixa nos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris, em particular no Domo Itabaiana-Simão Dias, como também no sul do Domínio Macururé e no Domo Jirau do Ponciano. A distribuição de produção superficial de calor pode ser bem observada na visão 3D mostrada na figura 8.

Figura 7
Mapa de isovalores da distribuição da taxa volumétrica de produção de calor no embasamento dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé margeante às bordas da Bacia Sergipe-Alagoas. No sul do mapa, aparecem, também, as contribuições das rochas do Domínio Salvador-Esplanada Boquim.

Figure 7
Isovalues map of volumetric rate of heat production distribution in the basement of the Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé domains bordering on the emerged edge of Sergipe-Alagoas Basin. In the south of the map, appear, also, the contributions of of Domain-Salvador-Esplanada Boquim rocks.

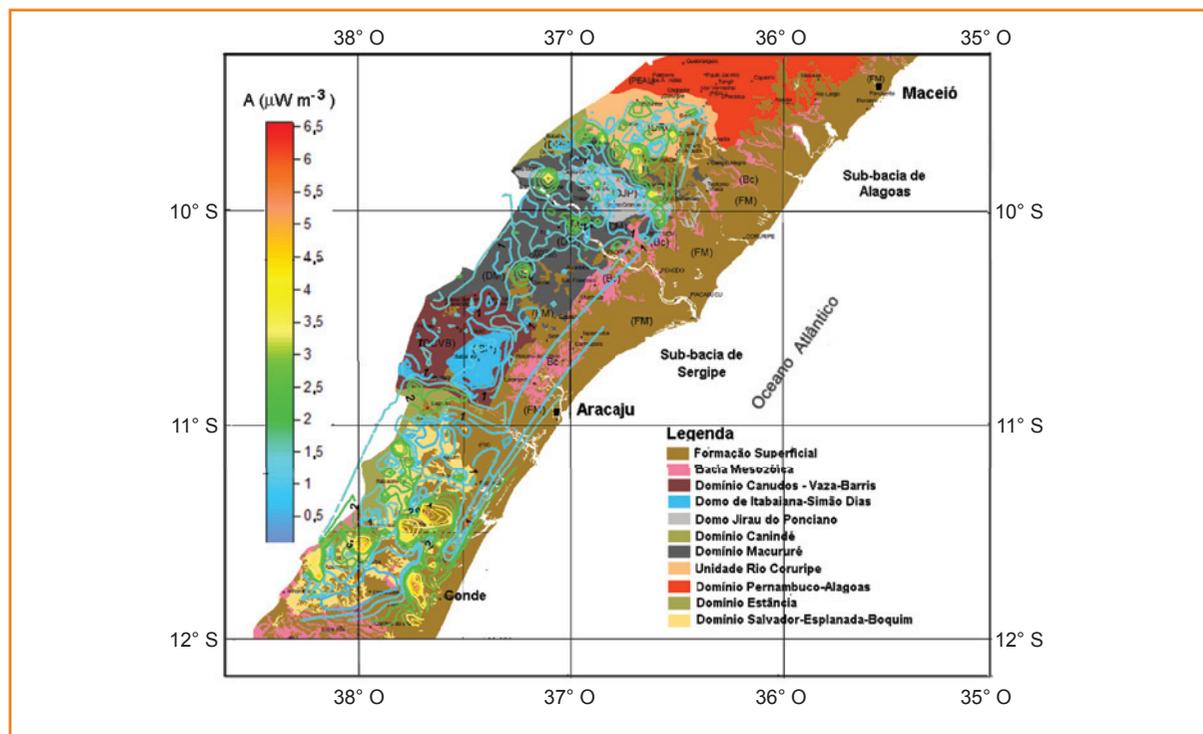
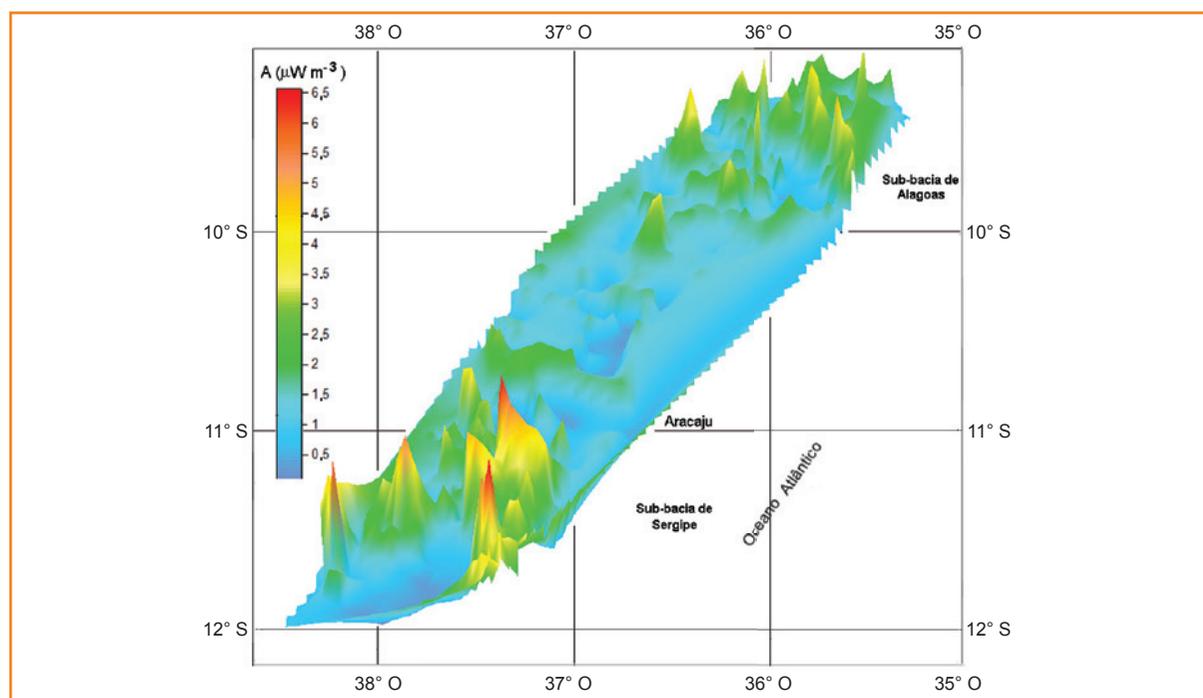


Figura 8
Visão 3D da distribuição da taxa volumétrica de produção de calor mostrada na figura anterior.

Figure 8
3D vision of the volumetric rate of heat production distribution shown in the previous figure.



seções crustais e fluxo de calor nos domínios

Pelo exposto no item anterior, é possível assumir que o Cráton do São Francisco está na base dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé e, também, em parte do embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas. O fluxo de calor nas superfícies desses domínios, gerado por suas crostas, é a soma da contribuição do fluxo de calor gerado por suas rochas mais a parcela gerada por seu substrato, o que assumiu-se serem rochas do Cráton do São Francisco. Conhecendo a função de variação vertical da produção de calor $A(z)$ no domínio e em seu substrato e a espessura destes, o fluxo de calor Q produzido por um bloco de rocha pode ser calculado com a expressão:

$$(a) Q = \bar{A}(z) \Delta z \quad \text{ou} \quad (b) Q = \int_{Z_1}^{Z_2} A(z) dz \quad (2)$$

Onde:

em (a): $\bar{A}(z)$ = taxa volumétrica média de produção de calor em um bloco de espessura Δz (não muito espesso);

em (b): a integral de $A(z)dz$ é feita nos limites Z_1 e Z_2 da espessura do bloco.

A determinação das espessuras das formações que constituem os domínios da Faixa Sergipana é dificultada, sobretudo, pelo padrão estrutural imbricado, resultante do tipo de tectônica de empurrão para SW. Na figura 4 indicam-se estimativas de valores médios para as espessuras das formações dos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris, bem como do Domínio Macururé. O Domínio Estância, constituído pelas formações Juetê, Acauã, Lagarto e Palmares (da base para o topo), tem uma espessura estimada de 3.480m. O Domínio Canudos-Vaza-Barris possui três grupos, englobando as formações Itabaiana, Ribeirópolis, Jacoca, Jacaré, Frei Paulo, Palestina e Olhos d'Água e possui espessura estimada em 2.900m.

Para o Domínio Macururé, há apenas a referência de D'el-Rey Silva (1995b) com uma espessura inferior a 13km. Entretanto, Oliveira *et al.* (2010) interpretam o Domínio Rio Coruripe (mais a norte) como composto de supracrustais metamorizadas em alto grau, chegando à fácies granulito como o equivalente de mais alto grau metamórfico do Domínio Macururé. Considerando essa interpretação como correta e admitindo-se um gradiente geotérmico de uma série metamórfica de média pressão compatível com as associações encontradas e descritas na literatura (Silva *et al.*, 1995; Bueno *et al.*, 2009b), seria

| Domínio | Grupo | Formação | Código da Unidade | TMPC* na unidade (esq.) e na formação (dir.) ($\mu W m^{-3}$) | Fluxo de calor gerado no domínio ($mW m^{-2}$) | |
|---|-------------|--------------|---|---|--|------|
| Estância | Estância | Palmares | NPp | 1,50 | 5,04 | |
| | | Lagarto | NPI | 1,60 | | |
| | | Acauã | NPac | 0,46 | | |
| | | Juetê | | | | |
| Canudos-Vaza-Barris | Vaza-Barris | Olhos d'Água | NPoa | 0,37 | 2,67 | |
| | | Palestina | NPpa | 1,29 | | |
| | Simão Dias | Frei Paulo | NPfp1 | 1,64 | | 1,55 |
| | | | NPfp2 | 1,54 | | |
| | | | NPfp3 | 1,63 | | |
| | Jacaré | NPja | 2,33 | | | |
| | Miaba | Jacoca | NPjc | 0,76 | | 1,41 |
| | | Ribeirópolis | NPr1 | 1,40 | | |
| | | | NPr2 | 1,20 | | |
| | | | NPr3 | 1,47 | | |
| Itabaiana | NPi | 0,32 | | | | |
| Domo de Itabaiana S. Dias | | | APpis | 0,92 | | |
| Macururé | Macururé | | NPm1 | 1,44 | 1,49 | |
| | | | NPm2 | 1,32 | | |
| | | | NPm3 | 1,19 | | |
| | | | NP3 γ i | 2,44 | | |
| | | | etc. | | | |
| | | Santa Cruz | NPmsc | 0,82 | 0,89 | |
| | | | NPmscx | 0,58 | | |
| Domo Jirau do Ponciano | | | APPn1, APPn2, APPjp | 1,21 | | |
| Cráton: Domínio Salvador-Esplanada-Boquim | | | APPg1, 2 e 3; APPgm, PP γ tp, PP γ gl, Da | 2,03 | | |

*TMPC - Taxa média de produção de calor

admissível, mesmo sem determinações das condições de T e P, estimar uma espessura preservada de cerca de 10km (desde a zona da biotita da fácies xisto verde até o meio da fácies granulito) (Winter, 2001).

Na tabela 1 apresentam-se as médias da taxa de produção de calor das rochas das unidades geológicas, das formações e dos domínios estudados, bem como as médias do fluxo de calor gerado em cada domínio. Utilizou-se preferencialmente a média aritmética como valor representativo da taxa de produção de calor. A análise feita nos histogramas mostrou que as distribuições não apresentam valores concentrados em um dos lados, gerando grande diferença entre as

Tabela 1

Valores médios da taxa de produção de calor das rochas das formações geológicas dos domínios estudados e do fluxo de calor gerado nessas formações e domínios.

Table 1

Mean values of the heat production rate of the geological formation rocks of the domains studied and of the heat flow generated in each domain.

médias aritmética e geométrica, o que indicaria o uso desta média. Por outro lado, verificou-se que as duas médias são bem próximas em vários casos, pelo fato de as distribuições serem ligeiramente assimétricas. A diferença máxima observada entre essas médias é de $0,17\mu W m^{-3}$, a qual, em uma espessura de mil metros, produz uma diferença no fluxo de calor gerado de apenas $0,17\mu W m^{-2}$. Apenas na Formação Acauã optou-se pela média geométrica.

As espessuras das formações que constituem os domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris são pequenas, por isso utilizou-se a equação 2 (a) para calcular as contribuições das rochas dessas formações para o fluxo geotérmico. Desse modo, a contribuição do domínio ao fluxo de calor é a soma das contribuições de cada formação.

O Domínio Macururé tem uma espessura estimada de 10.000m. Esse domínio é dividido em duas partes: uma a norte e outra a sul pelo Domo Jirau do Ponciano, uma elevação de rochas mais antigas por contatos normais. Assumindo o modelo de dobramentos da Faixa Sergipana, os depósitos da parte sul desse domínio, bem como as camadas mais superficiais dos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris proviriam de elevações mais ao norte. Sendo

assim, esperar-se-ia que a taxa volumétrica de produção de calor fosse maior nos depósitos do sul (topo estratigráfico) que nos do norte (base estratigráfica). Para as unidades NPm1, NPm2 e NPm3 do Grupo Macururé, obteve-se uma taxa volumétrica média de produção de calor de $1,31\mu W m^{-3}$ na parte sul do domínio e de $1,50\mu W m^{-3}$ para a unidade NPm1 na parte norte, médias essas que se equivalem dentro de um desvio padrão. Para todo o domínio, a média dessas duas unidades é $1,36\mu W m^{-3}$ e, quando incluem-se todas as unidades, inclusive os granitos, a média é de $1,40\mu W m^{-3}$.

Essa homogeneidade pode ocorrer devido à forma de deposição das rochas sobre os domínios antes do processo de dobramento, ocasionando a inexistência de uma variação significativa da taxa volumétrica de produção de calor com a profundidade. Desta forma, assume-se uma taxa volumétrica de produção de calor constante com a profundidade no Domínio Macururé e, em uma primeira aproximação, uma espessura constante em todo o domínio. Assim, a contribuição desse domínio para o fluxo de calor reduz-se ao produto da taxa vezes a espessura. Essa contribuição está apresentada na tabela 1.

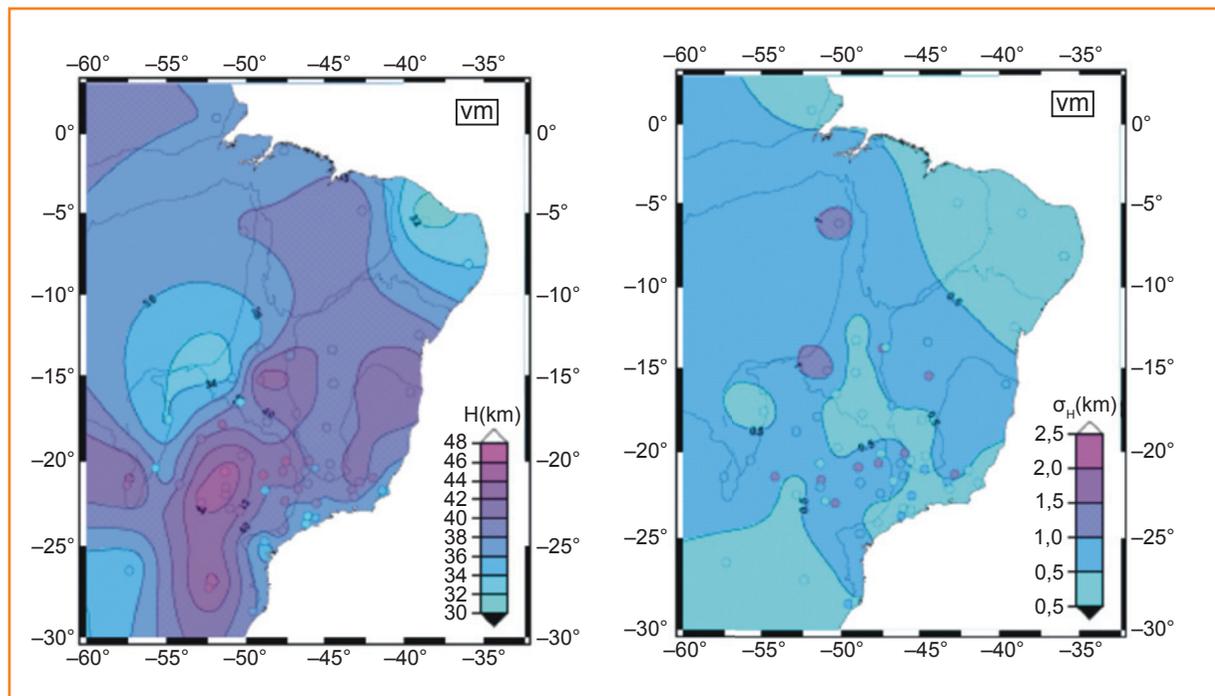


Figura 9 - Mapas da distribuição de espessura da crosta para a Plataforma Sul-Americana (esquerda), e do erro associado a essa medida (direita) obtidos com o uso de função do receptor para ondas P e S. Fonte: Marcelo B de Bianchi (2008).

Figure 9 - Maps of the thickness distribution of the crust to the South American platform (left), and of the error associated with this measure (right) obtained with the use of receptor function for P and S waves. After: Marcelo B de Bianchi (2008).

A espessura do substrato supracrustal de cada domínio pode ser obtida pela diferença entre a espessura local da crosta e a espessura do domínio. Na figura 9, mostram-se os mapas de distribuição da espessura da crosta na plataforma Sul-Americana (à esquerda) e do erro associado a essa espessura (à direita), devidos à Bianchi (2008). Nesses mapas, verifica-se que a espessura da crosta no Domínio Estância pode ser tomada como 37,0km \pm 0,5km e de 36,0km \pm 0,5km no restante da Faixa Sergipana. Usando-se esses valores e as espessuras dos domínios mostrados na figura 1, as espessuras dos substratos supracrustais sob os domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé são, respectivamente, 33,5km, 33,1km e 26,0km.

Para obter-se a função $A(z)$ no substrato, o qual assume-se ser constituído por rochas do Cráton do São Francisco, utiliza-se o modelo proposto por Reyes (2008) e Reyes *et al.* (2008). Àqueles autores obtiveram a função $A(z)$ para a borda oeste do Bloco Jequié do Cráton do São Francisco, estudando uma seção vertical da crosta local exposta na superfície por tectonismo. Em seu modelo, eles consideraram a crosta "original" com uma espessura de 51km,

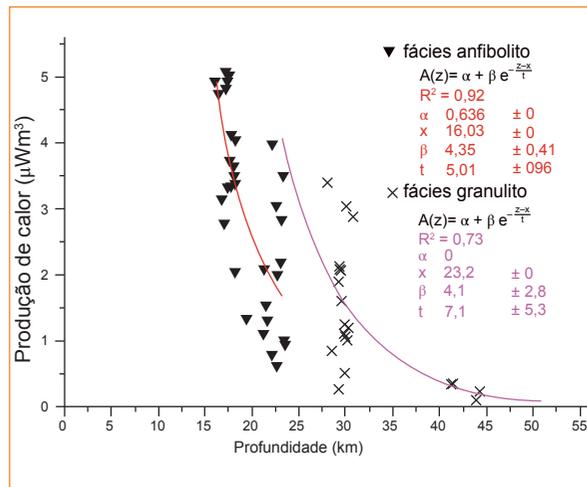


Figura 10 – Funções exponenciais de ajuste da distribuição vertical da taxa volumétrica de produção de calor na crosta da borda oeste do Bloco Jequié do Cráton do São Francisco obtidas separadamente para as rochas das fácies anfíbolito (vermelho) e granulito (carmim).

Figure 10 – Exponential functions to adjust the vertical distribution of volumetric rate of heat production in the crust of the western edge of the Block Jequié of the São Francisco craton obtained separately for the rocks of the amphibolite fácies (red) and granulite fácies (carmine).

sendo que, no presente, 16km da fácies xisto verde de seu topo foram erodidos, restando 35km (sendo 7,2km, entre 16km e 23,2km, da fácies anfíbolito e 27,8km, entre 23,2km e 51km da fácies granulito). Para a obtenção de $A(z)$, àqueles autores consideraram separadamente as fácies anfíbolito e granulito da crosta e obtiveram funções exponenciais de ajuste, para ambas as fácies do tipo:

$$A(z) = \alpha + \beta e^{-\frac{z-x}{t}} \quad (3)$$

Onde:

α , β , x e t são parâmetros a serem ajustados usando-se os dados experimentais. Os valores desses parâmetros e as exponenciais de ajuste para os dados das amostras das duas fácies estão mostrados na figura 10. Para esses valores, a função $A(z)$ é expressa pela equação 4 para a fácies anfíbolito e pela equação 5 para a fácies granulito:

$$A(z) = 0,64 + 4,35 e^{-\frac{z-16,0}{5,01}} \quad 16,0\text{km} \leq z \leq 23,2\text{km}, \quad (4)$$

$$A(z) = 4,06 e^{-\frac{z-23,2}{7,11}} \quad 23,2\text{km} \leq z \leq 51,0\text{km}, \quad (5)$$

Usando o modelo crustal descrito acima para o substrato dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé, as crostas nesses domínios podem ser caracterizadas como mostradas na figura 11.

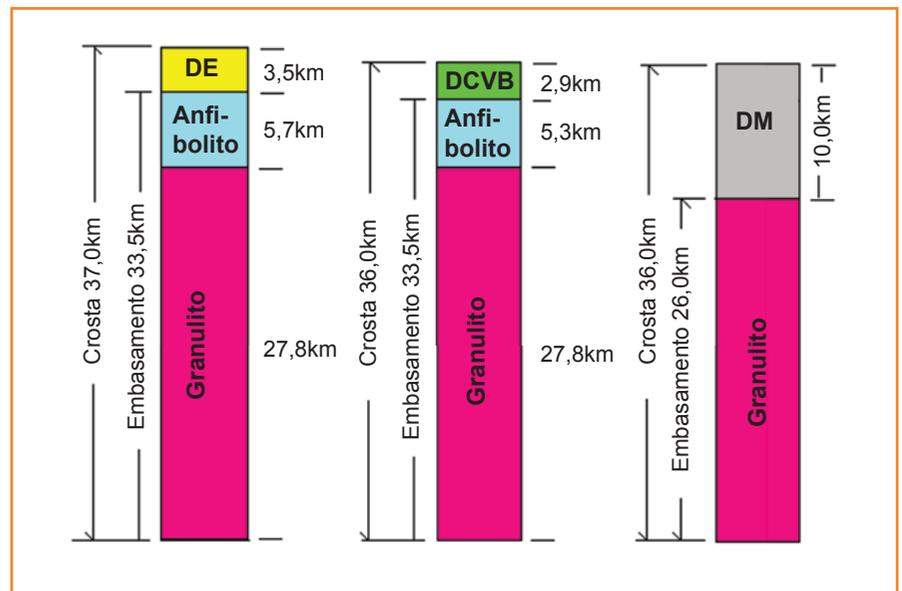


Figura 11

Modelos propostos para as crostas sob os domínios Estância (DE), Canudos-Vaza-Barris (CVB) e Macururé (DM), incluindo suas porções médias e inferiores constituídas por rochas metamórficas nas fácies granulito (Gra.) e anfíbolito (Anf.), respectivamente. Está indicada a espessura de cada porção.

Figure 11

Models proposed for the crusts beneath the Estância (DE), Canudos-Vaza-Barris (CVB) e Macururé (DM) domains, including their middle and lower portions, constituted by metamorphic rocks in granulite (Gra.) and amphibolite (Anf) fácies, respectively. Are indicated the thickness of each portion.

Considera-se que o Domínio Canudos-Vaza-Barris está assentado nas rochas do Domo de Itabaiana-Simão Dias. Como mostra a tabela 1, as rochas que afloram nesse domo apresentam, no conjunto, uma taxa média de produção de calor de $0,92\mu\text{W m}^{-3}$, considerada baixa quando comparada às médias de $3,1\pm 1,5\mu\text{W m}^{-3}$ da fácies anfibolito e de $2,5\pm 1,1\mu\text{W m}^{-3}$ da fácies granulito no modelo cratônico da figura 11 (Reyes, 2008). Não há informação sobre a espessura dessas rochas, mas acredita-se ser pequena. Sem informação sobre a espessura do domínio e sendo a média de produção de calor dessas rochas baixa, pode-se considerar a contribuição do domo para o fluxo de calor como insignificante de modo que pode-se considerar o Domínio Canudos-Vaza-Barris assentado diretamente no Cráton do São Francisco. Para o Domínio Macururé, não há informação sobre a espessura de prevalência das rochas do Domo Jirau do Ponciano, mas assumiu-se que a partir da profundidade de 10km devam prevalecer as rochas do cráton na fácies granulito.

Pela figura 10, as contribuições dos substratos ao fluxo de calor local são dadas por:

$$Q_{SDE} = \int_{17,5}^{23,2} \left(0,64 + 4,35 e^{-\frac{z-16,0}{5,01}} \right) dz + \int_{23,2}^{51,0} 4,06 e^{-\frac{z-23,2}{7,11}} dz, \quad (6)$$

$$Q_{SCVB} = \int_{17,9}^{23,2} \left(0,64 + 4,35 e^{-\frac{z-16,0}{5,01}} \right) dz + \int_{23,2}^{51,0} 4,06 e^{-\frac{z-23,2}{7,11}} dz, \quad (7)$$

$$Q_{SM} = \int_{25,0}^{51,0} 4,06 e^{-\frac{z-23,2}{7,11}} dz, \quad (8)$$

Os resultados dessas equações são mostrados na tabela 2.

Para obter-se o fluxo geotérmico na superfície tem-se de somar a contribuição da crosta ao fluxo de calor basal proveniente da astenosfera. Por não dispor-se de dados desse fluxo para as bacias de Sergipe e Alagoas, utilizar-se-á, como análogo, o fluxo basal de $19,0\text{mW m}^{-2}$ obtido por Reyes (2008) e Reyes *et al.* (2008) para a Bacia de Camamu, valor que está dentro da faixa de $18\text{-}33\text{mW m}^{-2}$ para o fluxo de calor basal continental em várias regiões da Terra (Vitarello e Pollack, 1980). Usando o valor de $19,0\text{mW m}^{-2}$ para o fluxo basal para a área de estudo deste trabalho, o fluxo geotérmico médio na superfície dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé são $66,9\text{mW m}^{-2}$, $63,1\text{mW m}^{-2}$ e $55,7\text{mW m}^{-2}$, respectivamente, e estão mostrados na tabela 2. Vê-se nessa tabela que o fluxo gerado na crosta nos três domínios corresponde a cerca de 70% do fluxo geotérmico na superfície. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Smithson e Decker (1974), Nicolaysen *et al.* (1980) e Reyes (2008) em estudos de seções verticais da crosta expostas na superfície.

Não se tem dados publicados de fluxo geotérmico no embasamento dos domínios Estância, Canudos-Vaza-Barris e Macururé para que se possa compará-los com os valores médios da tabela 2 esperados para essa faixa do embasamento. Existe, apenas, o trabalho de Fontes (2008) sobre fluxo térmico determinado em poços exploratórios e de valores médios em campos petrolíferos no interior da bacia. Para fins de comparação com os

Tabela 2

Valores médios para o fluxo geotérmico na superfície de cada domínio.

Table 2

Mean values for the geothermal flow at the surface of each domain.

| Domínio | Contribuição ao fluxo geotérmico, em mW m^{-2} | | | Fluxo geotérmico na superfície (mW m^{-2}) |
|--------------------|---|------------------------------|------------------|---|
| | da crosta do domínio | do embasamento sob o domínio | do fluxo basal * | |
| Estância | 5,0 | 42,9 | 19,0 | 66,9 |
| Canudo-Vaza-Barris | 2,7 | 41,4 | 19,0 | 63,1 |
| Macururé | 14,9 | 21,8 | 19,0 | 55,7 |

* Reyes (2008); Reyes *et al.* (2008)

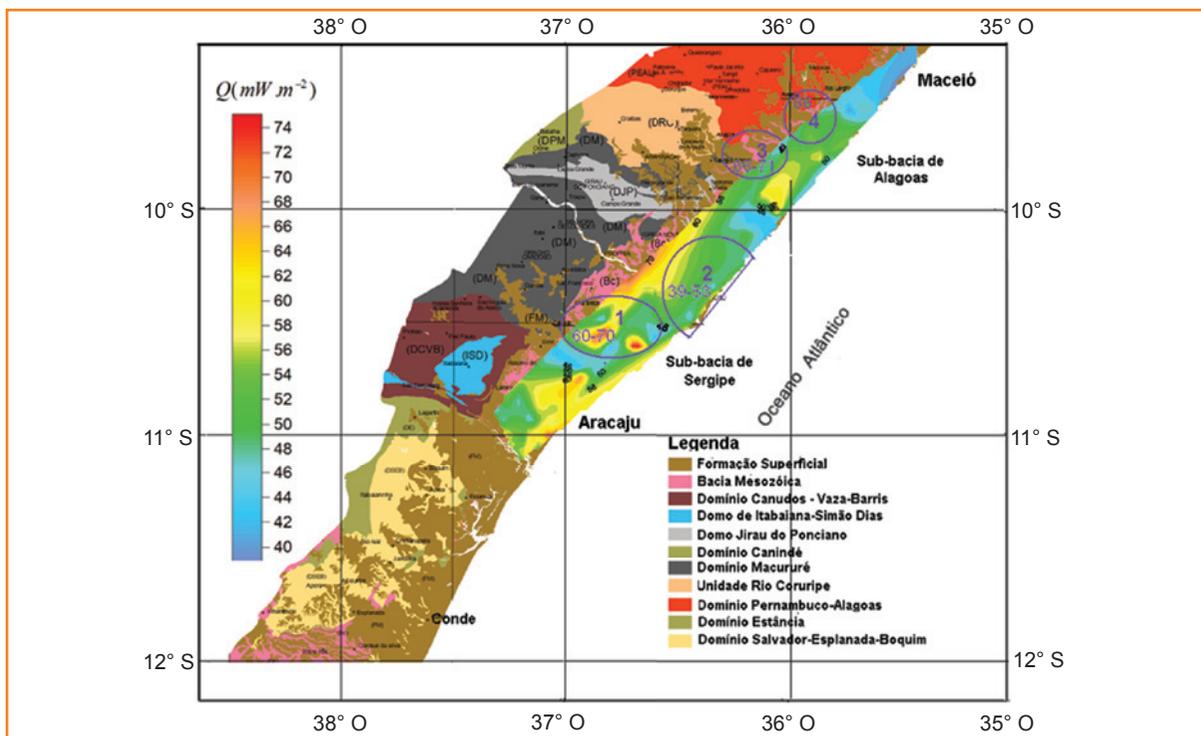


Figura 12
Mapa da distribuição de fluxo geotérmico numa parte emergida da Bacia Sergipe-Alagoas usando dados determinados por Fontes (2008) em poços de petróleo. As curvas fechadas são áreas de campos petrolíferos e os números internos indicam faixa de variação do fluxo térmico em $mW m^{-2}$.

Figure 12
Fill-color map of heat flow in an emerged part of the Sergipe-Alagoas Basin using data determined by Fontes (2008) in oil wells. The closed curves are areas of oil fields and the internal numbers indicate range of variation of heat flow in $mW m^{-2}$.

resultados obtidos, os dados de Fontes (2008) não são muito indicados porque se espera uma crosta mais fina no interior da bacia além das perturbações causadas pelas camadas sedimentares e pela presença de petróleo nos sedimentos. Por outro lado, os valores médios obtidos por Fontes para os campos de petróleo foram feitas sobre dezenas e até centenas de poços o que pode reduzir a margem de erro da média. Na falta de dados disponíveis de fluxo geotérmico no embasamento, usou-se os dados de Fontes (1980) para comparação com os dados calculados neste trabalho e, com eles, construiu-se o mapa de fluxo geotérmico na parte emergida da Bacia Sergipe-Alagoas mostrado na figura 12. Nesse mapa, as curvas fechadas são áreas de campos petrolíferos e os números internos indicam faixa de variação do fluxo geotérmico médio nos campos em $mW m^{-2}$.

A área do Domínio Estância estende-se da latitude $11^{\circ} 30' S$ a $10^{\circ} 50' S$ (fig. 12) e nela espera-se um fluxo geotérmico médio de $66,9 mW m^{-2}$ (tabela 2). Vê-se, na figura 10, que essa área engloba o limite sul dos dados de fluxo geotérmico observados cujos valores estão entre $56-68 mW m^{-2}$; isto sugere que o Domínio Estância pode estar na base dessa parte da bacia. O grupo 1 de campos petrolíferos situa-se entre os domínios Canudos-Vaza-Barris e Macururé e apresenta fluxos médios entre $60-70 mW m^{-2}$. Para esses dois domínios os fluxos geotérmicos médios calculados são,

respectivamente, $63,1 mW m^{-2}$ e $55,7 mW m^{-2}$ (tabela 2) de modo que ambos os domínios podem constituir o embasamento dessa área. O grupo 2 de campos na figura 12 situa-se na faixa do Domínio Macururé com médias de fluxo geotérmico entre $39-53 mW m^{-2}$; esse domínio, com fluxo calculado de $55,7 mW m^{-2}$ pode constituir a base dessa parte da bacia.

Os grupos 3 e 4 na figura 12 situam-se na área do Domínio Macururé, mais precisamente da Unidade Rio Coruripe e apresentam fluxo geotérmico variando de $66-71 mW m^{-2}$. Esses valores são altos quando comparados ao fluxo médio de $55,7 mW m^{-2}$ obtido para o Domínio Macururé o qual deve ser o principal constituinte do embasamento dessa parte da bacia. Foram levantadas duas hipóteses para explicar a discrepância entre esses fluxos. Uma primeira hipótese baseia-se na consideração de Reginaldo Alves Santos (comunicação pessoal) de que, ainda que não se tenha evidências em observações na superfície, a lógica permite inferir que o Domínio Macururé deve ser mais raso em seu extremo norte, onde afloram sua base e a Formação Santa Cruz. Por essa consideração, o domínio Macururé sendo mais raso em sua borda norte, o substrato ali é mais espesso e, como consequência, o fluxo de calor gerado é maior. Por exemplo, se a espessura do Macururé reduzir de 10km para 5km, o fluxo geotérmico local calculado passa para $66,3 mW m^{-2}$ e explicaria os fluxos mais altos comentados acima.

Uma segunda hipótese é que os vários corpos de granito que afloram no norte do Domínio Macururé, particularmente na Unidade Rio Coruripe, sejam suficientemente espessos em alguns locais para contribuir significativamente com o fluxo de calor local já que possuem taxa de produção de calor alta (fig. 10). Ou, ainda, que a Unidade Rio Coruripe tenha uma composição crustal distinta daquela do Domínio Macururé.

Acima da latitude de 9° 35', o embasamento deve ser constituído pelo Domínio Pernambuco-Alagoas o qual não foi tratado neste artigo.

conclusões

A concordância entre os valores do fluxo geotérmico médio obtidos neste artigo utilizando modelos de distribuição vertical de produção de calor para as crostas e os dados de fluxo geotérmico levantados por Fontes, demonstra a validade dos modelos utilizados. Demonstra, também, a possibilidade de produzirem-se tais modelos para crostas a partir de estudos geofísicos e geológicos em afloramentos do embasamento.

Nos domínios Estância e Canudos-Vaza-Barris, o fluxo de calor produzido por suas crostas deve-se quase totalmente à contribuição das rochas cratônicas de seus substratos.

Valores observados do fluxo geotérmico na borda norte do Domínio Macururé mais altos que os calculados sugerem que este pode ser menos espesso nessa borda ou a Unidade Rio Coruripe, que constitui essa borda, tem uma composição crustal distinta daquela do Domínio Macururé.

agradecimentos

Agradecemos ao geólogo Reginaldo Alves Santos por suas considerações que estimulou várias ideias expressas neste trabalho. Agradecemos, também, à comissão organizadora do Boletim de Geociências da Petrobras pela oportunidade de publicar este trabalho. E ao revisor anônimo pelas valiosas sugestões.

Este trabalho foi desenvolvido dentro do Projeto "Geração de calor nas bacias de Cumuruxatiba, Jequitinhonha, Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba e nos embasamentos adjacentes" do Programa

Tecnológico de Exploração de Modelagem de Bacias do Centro de Pesquisas da Petrobras (Promob/Cenpes), referência 0050.038629.07.4.

referências bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.

ASHWAL, L. D.; MORGAN, P.; KELLEY, S. A.; PERCIVA, J. A. Heat production in an Archean crustal profile and implications for heat flow and mobilization of heat-producing elements. **Earth and Planetary Sciences Letters**, Amsterdam, v. 85, n. 4, p. 439-450, Oct. 1987.

BIANCHI, M. B. **Variações da estrutura da crosta, litosfera e manto para a plataforma Sul Americana através de funções do receptor para ondas P e S**. 2008. 133 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, São Paulo, 2008.

BIRCH, F.; ROY, R. F.; DECKER, E. R. Heat flow and thermal history and New England and New York. In: (Ed.). ZEN, E.; WHITE, W. S.; HADLEY, J. B.; THOMPSON JUNIOR, J. B. **Studies of Appalachian Geology**: Northern and Maritime. New York: Interscience, 1968. p. 437-451.

BRITO NEVES, B. B. **Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordeste**. 1975. 198 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

BRITO NEVES, B. B.; SIAL, A. N.; ALBUQUERQUE, J. P. T. Vergência centrífuga residual no sistema de dobramentos Sergipano. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 102-114, 1977.

BUENO, J. F.; SOUZA, J. J.; ARAÚJO, M. N. C.; OLIVEIRA, E. P. Evolução tectono-cronológica da estrutura de interferência de Nossa Senhora de Lourdes, Faixa Sergipana, NE-Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 4, p. 608-623, dez. 2009.

DAVISON, I.; SANTOS R. A. Tectonic evolution of the Sergipano Fold Belt, NE Brazil, during the Brasiliano

- Orogeny. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 45, n. 4, p. 319-342, Dec. 1989.
- D'EL-REY SILVA, L. J. H. **Tectonic evolution of the southern part of the Sergipano Fold Belt, northeastern Brazil**. 1992. 257 f. PhD Thesis – University of London, England, Royal Holloway, 1992.
- D'EL-REY SILVA, L. J. H.; McClay, K. R. Stratigraphy of the southern part of the Sergipano Belt, NE Brazil: tectonic implications. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 3, p.185-202, set. 1995a.
- D'EL-REY SILVA, L. J. H. The evolution of basement gneiss domes of the Sergipano fold belt (NE Brazil) and its importance for the analysis of Proterozoic basins. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 8, n. 3-4, p. 325-340, July/Oct. 1995b.
- D'EL-REY SILVA, L. J. H. 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**, Amsterdam, v. 12, n. 5, p. 453-470, Sept. 1999.
- DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas do Cráton São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (Ed.). **O Cráton do São Francisco**. Salvador: SBG, 1993. p. 137-159.
- DRURY, M. Heat flow provinces reconsidered. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Amsterdam, v. 49, n. 1-2, p. 78-96, Nov. 1987.
- FONTES, L. C. A. A. **Determinação do fluxo geotérmico na bacia sedimentar Sergipe-Alagoas**. 1980. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1980.
- FOUNTAIN, D. M.; SALISBURY, M. H. Exposed cross-sections through the continental crust: implications for the crustal structure, petrology and evolution. **Earth and Planetary Sciences Letters**, Amsterdam, v. 56, p. 263-277, Dec. 1981.
- HAWKESWORTH, C. J. Vertical distribution of heat production in the basement of the Eastern Alps. **Nature**, v. 249, n. 5456, p. 435-436, May 1974.
- KREMENTSKY, A. A.; OVCHINNIKOV, L. N. The Precambrian continental crust: its structure, composition, and evolution as revealed by deep drilling in the U.S.S.R. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 33, n. 1-3, p. 11-43, Sept. 1986.
- KREMENTSKY, A. A.; MILANOVSKY, S. YU; OVCHINNIKOV, L. N. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic Shield. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 159, n. 3-4, p. 231-246, Mar. 1989.
- LACHENBRUCH, A. H. Crustal temperature and heat production: Implications of the linear heat-flow relation. **Journal of Geophysical Research**, Malden MA, v. 75, n. 17, p. 3291-3300, Jan. 1970.
- MOTTAGHY, D.; SCHELLSCHMIDT, R.; POPOV, Y. A.; CLAUSER, C.; KUKKONEN, L. T.; NOVER, G.; MILANOVSKY, S.; ROMUSHKEVICH, R. A. N. New heat data from the immediate vicinity of the Kola super-deep borehole: vertical variation in heat flow confirmed and attributed to advection. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 401, n. 1-2, p. 119-142, May 2005.
- MORGAN, P. Crustal radiogenic heat production and the selective survival of ancient continental crust. Part 2. **Journal of Geophysical Research**, Malden MA, v. 90, n. S02, p. C561-C570, Feb. 1985. Proceedings of 15th Lunar and Planetary Science Conference.
- NEVES, S.P.; BRUGUIER, O.; VAUCHEZ, A.; BOSCH, D.; SILVA, J. M. R.; MARIANO, G. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): implications for western Gondwana assembly. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 149, n. 3-4, p. 197-216, Sept. 2006.
- NICOLAYSEN, L. O.; HART, R. J.; GALE, N. H. The Vredefort element profile extended to supracrustal strata at Carletonville, with implications for continental heat flow. **Journal of Geophysical Research**, Malden MA, v. 86, n. B11, p. 10653-12218, Jan. 1981.
- OLIVEIRA, E. P., S. F. TOTEU, M. N. C. ARAÚJO, M. J. CARVALHO, R. S. NASCIMENTO, J. F. BUENO, J. F.; MCNAUGHTON, N.; BASILICI, E. G. Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaoundé schist belt (Cameroon,

- Africa). **Journal of African Earth Sciences**, Amsterdam, v. 44, n. 4-5, p. 470-478, 2006.
- OLIVEIRA, E. P.; WINDLEY, B. F.; ARAUJO, M. N. C. The Neoproterozoic Sergipano orogenic belt, NE Brazil: a complete plate tectonic cycle in western Gondwana. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 181, n. 1-4, p. 64-84, Aug. 2010.
- OLIVEIRA, R. G. **Arcabouço geofísico, isostasia e causa do magmatismo Cenozoico da Província Borborema e de sua margem continental (nordeste do Brasil)**. 2008. 411 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2008.
- OLIVEIRA, R. G.; SANTOS, E. J. Magnetic Framework of the Borborema Province, Northeast Brazil: an interpretation from digital data. Potential Field Methods: Case histories. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., Rio de Janeiro, 1999. **Proceedings...** Rio de Janeiro: SBGf, 1999. p. 113. 1 CD-ROM.
- PRIBNOW, D. F. C.; WINTER, H. R. Radiogenic heat production in the upper third of continental crust from KTB. **Geophysical Research Letters**, Malden MA, v. 24, n. 3, p. 349-352, Feb. 1997.
- REYES, L. M. G. **Distribuição vertical da taxa volumétrica de produção de calor radiogênico no Cráton do São Francisco**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2008.
- REYES, L. M. G.; ARGOLO, R. M.; MARINHO, M. M. Repartição do fluxo térmico nas Bacias de Camamu e Almada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 3., Belém do Pará, 2008. **Anais...** Belém do Pará: SBGf, 2008.
- RYBACH, L. Amount and significance of radioactive heat sources in sediments. In: BURRUS, J. (Ed.) **Thermal Modeling in Sedimentary Basins**. Paris: Technip, 1986. p. 311-322.
- SANTOS, E. J. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. **Anais...** Salvador, SBG, 1996. v. 6, p. 47-50.
- SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE-Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 73-84, mar. 1999.
- SANTOS, R. A.; MARTINS, A. A. M.; NEVES, J. P. **Geologia e recursos minerais do estado de Sergipe**. Salvador: CPRM, 1998.
- SCHNEIDER, R. V.; ROY, R. F.; SMITH, A. R. Investigations and interpretations of the vertical distribution of U, Th and K: South Africa and Canada. **Geophysical Research Letters**, v. 14, n. 3, p. 264-267, Mar. 1975.
- SILVA, J. M. R.; CAMPOS NETO, M. C.; BRITO NEVES, B.B. Deformação e metamorfismo principais de uma parte da Faixa Sul-Alagoana (Complexo Macururé), Sistema de Dobramentos Sergipano, nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 343-350, dez. 1995.
- SILVA FILHO, M. A. Arco vulcânico de Canindé-Marancó e a Faixa Sul-Alagoana: sequências orogênicas Mesoproterozoicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 40., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBG, 1998. v. 1, p. 16.
- SILVA FILHO, M. A.; TORRES, H. H. F. A new interpretation on the Sergipano Belt Domain. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 74, n. 3, p. 556-557, 2002.
- SMITHSON, S. B.; DECKER, E. R. A continental crustal model and its geothermal implications. **Earth Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 22, n.3, p. 215-225, 1974.
- TROMPETTE, R. **Geology of Western Gondwana (200-500 Ma) Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa**. A. A. Balkema, Rotterdam Brookfield, 1994. 350 p.
- TROMPETTE, R. Neoproterozoic (~600 Ma) aggregation of Western Gondwana: a tentative scenario. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 82, n. 1-2, p. 101-112, Mar. 1997.
- TROMPETTE, R. Gondwana evolution; its assembly at around ~ 600 Ma. **Comptes Rendus de**

I' Académie Sciences de Paris, Series 2A – Earth and Planetary Science, v. 330, n. 5, p. 305-315, Mar. 2000.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P. C.; BABINSKI, M. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeast Brazil: initial conclusions. **Journal of South American Earth Sciences**, Amsterdam, v. 8, n. 3-4, p. 267-288, July/Oct. 1995.

VAN SCHMUS, W. R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. **Journal of South**

American Earth Sciences, Amsterdam, v. 31, n. 2-3, p. 227-252, Mar. 2011.

VILLENEUVE, M.; CORNÉE, J. J. Structure, evolution and palaeogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 69, n. 1-4, p. 307-326, Oct. 1994.

VITORELLO, I.; POLLACK, H. N. On the variation of continental heat flow with age and the thermal evolution of continents. **Journal of Geophysical Research**, Malden MA, v. 85, n. B2, p. 985-995, Jan. 1980.

WINTER, J. D. **An introduction to igneous and metamorphic petrology**. Prentice Hall, 2001. 699 p.

expanded abstract

The Earth heat production is mainly due to the heat generated by the transformation of the kinetic energy of particles and radiations emitted by radioactive decay of natural radioisotopes in the process of their interaction with the Earth materials. This heat, referred as radiogenic heat, represents about 98% of the internal heat generated by the Earth.

The amount of heat generated by a rock depends mainly on its contents of K, U and Th. It is greater in the crust than in the mantle; however, only a fifth of the radiogenic heat is produced by the earth's crust due to the higher volume of the mantle. The heat production in the crust is laterally heterogeneous contributing a few per cent for the surface heat flow in areas of basic rocks and up to 70% in granitic terrain (Morgan, 1985). Vertically, the rate of crustal heat production decreases with depth, but the form of this decrease is not well known.

In a sedimentary basin, the radiogenic heat generated by the basement rocks and sediments, added to the basal heat flow, results in the geothermal flow. This flow plays an important role in the basin thermal history, and its knowledge is important to evaluate the possibility of hydrocarbon generation. Such evaluation, conducted by thermomechanical modeling of the basin, requires the knowledge of density and of the thermal properties of the basement rocks and of basin sediments as the volumetric rate of radiogenic heat production, the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat.

In this work, we determine the heat flow in some parts of the Sergipe-Alagoas Basin using models of the crust of the geotectonic domains of the Sergipano Belt which constitute the basement adjacent to the basin.

The Sergipano Belt, situated between the São Francisco craton to the south and Pernambuco-Alagoas domain to the north, resulted from a collision between the Congo-São Francisco craton, and the Pernambuco-Alagoas massif during the Brasilian-Panafrican orogeny. It is partitioned into tectono-stratigraphic domains whose division varies with different authors. We adopt the division proposed by Santos et al. (1998) that established six domains which are, from south to north, Estância, Canudos-Vaza-Barris, Macururé, Marancó, Poço Redondo and Canindé.

Our study area is located on the Brazil northeast coast and comprises a strip 50km wide of the basement

adjacent to the emerged margin of the Sergipe-Alagoas sedimentary basin, in an extension of 440km along the ocean shore. This strip includes parts of the Salvador-Esplanade-Boquim, Estância, Canudos-Vaza-Barris, and Macururé domains, which we assume to be present in the base of the basin.

In 1.483 visited outcrops, we made the lithological descriptions, including macroscopic aspects such as color, texture, mineral composition and rock classification, as well as the tectonic-structural elements of each unit (involving S plans and L lines, fold axes, among others). Also, we determined the K, U and Th contents by gamma-ray spectrometry using a portable gamma-spectrometer and collected rock samples.

In the laboratory, we analyze 1.623 rock samples to bulk density, K, U and Th contents by gamma-ray spectrometry using scintillation detectors of INa (TI) installed in lead castles and calculated the volumetric rate of heat production.

As a result of the amalgamation process that inserted the Borborema Province into the context of Pan-African-Brasilian orogeny, it is observed the continuity of shear zones and lineaments of the Borborema Province to the west African; in particular, it is observed that the Sergipano Belt represents the segment west of the Obanguides orogeny that extends in north-west Africa.

This trend of shear zones is observed also in the interpretations of the Bouguer anomaly map and in the residual component of the total magnetic field reduced to pole. These interpretations show the nearly perpendicular getting through the shear zones and lineaments in the direction of the continental shelf. This means that the Sergipano Belt domains – at least some of them – should be part of the basement of the Sergipe-Alagoas Basin, together with the Pernambuco-Alagoas domain, this further north.

The Sergipano Belt domains are separated from each other by the Neoproterozoic shear zones of Itaporanga, São Miguel do Aleixo, Belo Monte-Jeremoabo and Macururé. In the of tectonic evolution model of the Sergipano Belt proposed by Oliveira et al. (2010), the São Francisco craton is underneath the Estância, Canudos-Vaza-Barris and Macururé domains and forms their substrates. So, the heat flow generated in each domain crust is the heat flow generated in the domain geological formations and in its substrate.

For the geological formations of the domain, we estimate the thickness, computed the averaged volumetric rate of heat production and, with these

results, determined the total heat flow generated in the domain. To obtain the heat flow generated in the cratonic substratum, we estimate its thickness and use a model to obtain the function $A(z)$ for the vertical variation of the volumetric rate of heat production. In this model, we assume that the cratonic rocks are in amphibolite and granulite *fácies* in the Estância and Canudos-Vaza-Barris domains and in granulite *fácies* in the Macururé Domain. Using this procedure, we compute the average geothermal surface flow generated in the crusts of these three domains. Using the value of 19.0mW m^{-2} for the basal heat flow, we obtained the main geothermal flows of 66.8mW m^{-2} for the Estância domain, 64.1mW m^{-2} for the Canudos-Vaza-Barris domain and 54.8mW m^{-2} for the Macururé domain. In these values, the flows generated in the crusts correspond to about 70% of the total flow, which is in agreement with results of other authors. The main heat flows obtained proved to be consistent

with known values of geothermal flows in several parts of the basin in which the various domains were considered to be present.

The agreement between the results obtained in this work and heat flow published data, demonstrate the validity of vertical distribution models of heat production used in the crusts studied. It also shows the possibility to produce such models for crusts from geophysical and geological studies conducted in outcrops of the basement.

In the Estância and Vaza-Barris domains, heat production in their crusts is due almost entirely to the cratonic rocks of their substrates.

To explain the high discrepancy between the values measured and obtained in the northern edge of the domain Macururé, we suggest that this domain may be thinner in its northern edge or the Rio Coruripe unit, which forms that border, has a crustal composition different from that of the Macururé domain.

autores



Roberto Max de Argollo
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia
Departamento de Física da Terra e do
Meio Ambiente

robmax@ufba.br

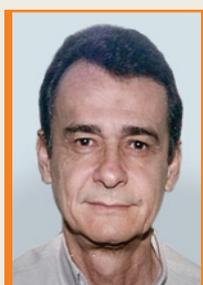
Roberto Max de Argollo é bacharelado em Física pela então Universidade do Brasil, hoje Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1963, Mestre em Oceanografia pela University of Rhode Island, USA, (1974) e Doutor em Geofísica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) em 2001, onde é professor titular aposentado e onde continua atuando no curso de pós-graduação em Geofísica e como pesquisador do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia. Suas áreas de pesquisa atuais envolvem produção de calor radiogênico em rochas, estrutura de produção de calor nas crostas e fluxo geotérmico.



Alexandre Barreto Costa
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia
Departamento de Física da Terra e do
Meio Ambiente

abc@ufba.br

Alexandre Barreto Costa é bacharel em Física (1997), Mestre em Geofísica (2001) e Doutor em Geofísica (2006) pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), onde é professor adjunto II e pesquisador do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA. Suas áreas de interesse são geofísica nuclear, nos temas de radioatividade e isótopos estáveis em rochas, sedimentos, matéria orgânica e águas e geotermia nos temas de produção de calor radiogênico e propriedades térmicas de rochas.



Moacyr Moura Marinho
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia
Departamento de Geoquímica

mmm@ufba.br

Moacyr Moura Marinho é geólogo pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) em 1968 e Doutor em Geologia-Geoquímica pela Université Blaise Pascal (Clermont Ferrand II), França (1991). Trabalhou na Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e na Companhia Baiana de Pesquisas Minerais (CBPM), onde foi diretor técnico por 12 anos. É professor associado III do Departamento de Geologia e pesquisador do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA. Sua área de interesse é petrologia, atuando nos temas de petrologia ígnea, geocronologia, geoquímica isotópica e metamorfismo.



Heli de Almeida Sampaio Filho
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia
Departamento de Geoquímica

hasampaio@hotmail.com

Heli de Almeida Sampaio Filho é geólogo (1967) e Mestre em Geociências (1976) pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). É professor adjunto aposentado da UFBA com especialidade em Mineralogia Ótica e Petrologia. Trabalhou na Superintendência de Geologia e Recursos Minerais (SGM), onde foi diretor adjunto e assessor técnico, coordenador do Museu Geológico da Bahia (1999-2008) e participou, como pesquisador, em projeto de pesquisa na UFBA (2008-2011). É analista técnico da Secretaria da Indústria. Sua área de interesse é petrologia, com ênfase em rochas cristalinas.



Edilton José dos Santos
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Centro de Tecnologia e Geociências

ediltonjsantos@gmail.com

Edilton José dos Santos é geólogo pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1963 e Doutor em Geociências pela Universidade de São Paulo (USP) em 1995. Foi geólogo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), da Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e professor visitante do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. É chefe da Divisão de Geologia Básica da CPRM. Suas pesquisas atuais envolvem o estudo da fragmentação e colagem de terrenos da Província Borborema, no contexto dos supercontinentes Rodinia e Gondwana e a análise tectônica das fases rifte e transicional das bacias Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas.



Luiz Felipe Carvalho Coutinho
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)
P&D em Geociências
Gerência de Geoquímica

lufelipe@petrobras.com.br

Luiz Felipe Carvalho Coutinho graduou-se em Geologia em 1985 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Mestre em Geologia pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em 1988 e Doutor em 2008 pela UFRJ e Université Pierre et Marie Curie (Paris/França) em regime de cotutela, na área de concentração de modelagem de sistemas petrolíferos. Ingressou na Petrobras em 1988, onde exerceu atividades de acompanhamento e perfuração de poços em regime de treinamento. A partir de 1989, integrou o quadro do Distrito de Exploração do Norte da Petrobras (Denor), trabalhando em análise e modelagem de sistemas petrolíferos e dando suporte à interpretação exploratória das bacias do Amazonas, Solimões, Barreirinhas e Parnaíba. Em 1995 foi transferido para a Unidade de Negócios de E&P da Petrobras na Bahia, dando prosseguimento aos estudos de modelagens de sistemas petrolíferos agora nas bacias de sua jurisdição. Desde 2002 integra o quadro de pesquisadores da Centro de Pesquisas Petrobras (Cenpes). É consultor com especialização em Geoquímica, modelagem termomecânica e de sistemas petrolíferos, sendo gestor de projetos nestas áreas de concentração e integrante da equipe de desenvolvimento do *software* SIMBR para modelagem de bacias.

