Observatório Nacional

Divisão de Programas de Pós-Graduação

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DA BACIA DE CAMPOS - SE BRASIL E AVALIAÇÃO DE SEUS RECURSOS ENERGÉTICOS

Beatriz Lessa de Jesus

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr. Fábio Pinto Vieira

Co-orientador(a): Dra. Suze Nei Pereira Guimarães

Rio de Janeiro
Março de 2026

"Características Térmicas da Bacia de Campos – SE Brasil e Avaliação de seus Recursos Energéticos"

Beatriz Lessa de Jesus

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM GEOFÍSICA.

Aprovada por:

Dr. Fábio Pinto Vieira - (ON) - (Orientador)

Dr. Artur Santos Benevides - (ON)

Dr. Alexis Rosa Nummer- (UFRRJ)

RIO DE JANEIRO – BRASIL

24 DE FEVEREIRO DE 2026

Lessa de Jesus, Beatriz

Características Térmicas da Bacia de Campos - SE Brasil e avaliação de seus Recursos Energéticos/Beatriz Lessa de Jesus. – Rio de Janeiro: ON, 2026.

ii, 75 p. 29, 7cm.

Orientador(a): Fábio Pinto Vieira

Co-orientador(a): Suze Nei Pereira Guimarães

Dissertação (mestrado) – ON/Programa de Pós-graduação em Geofísica, 2026.

Referências Bibliográficas: p. 58 – 67.

1. geotermia. 2. bacia de Campos. 3. fluxo de calor. 4. recursos energéticos. I. Nei Pereira Guimarães, Suze. II. Observatório Nacional, Programa de Pós-graduação em Geofísica. III. Título.

Dedico este trabalho a Deus, Lucas e à minha família, por sua fé, apoio e presença em toda a minha trajetória.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todo o cuidado e misericórdia, por guiar meus caminhos, me fortalecer e me capacitar para chegar até aqui. Sem Ele, nada seria possível, e é pela Sua graça que conquistei este momento.

Ao meu namorado, Lucas, agradeço pelo suporte constante, por torcer e estar ao meu lado em cada etapa, acreditando em mim mesmo quando eu duvidava. Obrigada por me incentivar, me levantar e compartilhar cada conquista. Estendo minha gratidão à sua família – Luci, Sérgio e Carol – que considero minha também, por sempre me apoiar, vibrar comigo e orar pelo meu sucesso.

Dedico ao meu pai toda a admiração e reconhecimento; sua vida é uma inspiração para que eu continue estudando e buscando sempre evoluir. À minha mãe, por interceder por mim e torcer por minhas conquistas, e ao meu irmão Eduardo, por seu apoio constante, conselhos e cuidado em momentos desafiadores.

Ao Dr. Fábio Pinto Vieira, registro minha profunda gratidão pela orientação dedicada, paciência e incentivo ao longo de toda a realização desta dissertação. À minha coorientadora, Prof.ª Suze Nei Pereira, deixo um agradecimento especial: sua orientação atenta, críticas construtivas, amizade e apoio desde minha graduação foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Ter sua parceria na minha trajetória acadêmica é um verdadeiro privilégio.

Agradeço ao Prof. Sergio Luiz Fontes, coordenador do projeto Multifísca – Petronas, por me incluir nesta iniciativa e proporcionar experiências únicas de aprendizado e colaboração.

Sou grata ao Observatório Nacional pelo acompanhamento institucional e às agências de fomento CAPES e, posteriormente, FAPERJ, pelo apoio financeiro indispensável à execução deste trabalho. Agradeço também à Petronas pelo suporte financeiro e pela oportunidade de participação no projeto.

Aos amigos que fiz ao longo desta caminhada, meu muito obrigada. Nina, suas ideias foram fundamentais em todo o processo. Nicolas, obrigada pelo auxílio com softwares e ferramentas. Às amizades da pós-graduação – Levi, Razec e Liliane – obrigada pelas conversas, momentos de descontração, cafés e apoio. Ao Fábio, amigo que a geotermia me deu e parceiro de eventos e apresentações. À Mariana, parceira nas disciplinas mais desafiadoras e nos estudos. Aos colegas do Observatório

Nacional e das aulas, torço pelo sucesso de cada um.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação, deixo meu sincero agradecimento.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DA BACIA DE CAMPOS - SE BRASIL E AVALIAÇÃO DE SEUS RECURSOS ENERGÉTICOS

Beatriz Lessa de Jesus

Março/2026

O presente estudo tem como objetivo principal identificar e caracterizar estruturas térmicas crustais distintas na região da Bacia Sedimentar de Campos, situada no sudeste do Brasil. A bacia de Campos tem uma importância relevante na produção de petróleo no Brasil, atualmente com foco nos sedimentos do Pré-sal. Estudos geotérmicos podem ajudar na compreensão dos processos evolutivos das bacias sedimentares com a determinação do regime térmico crustal da zona de transição continente-oceano, como é o caso das bacias sedimentares do tipo margem passiva e, consequentemente, no melhor entendimento do potencial exploratório do local. Para esse objetivo, foram incorporados dados geotérmicos provenientes de medidas em poços profundos do tipo BHT's (*Bottom Hole Temperature*) em regiões offshore da bacia, para mapeamento da distribuição de seus parâmetros geotermais. A incorporação de novos dados possibilitou o refinamento da caracterização do estado térmico da crosta na bacia estudada, permitindo uma análise mais detalhada da variação da temperatura em função da profundidade. Esse aprimoramento contribuiu para uma melhor compreensão dos processos térmicos crustais, reduzindo incertezas nos modelos térmicos existentes e fornecendo subsídios mais robustos para interpretações geológicas e geofísicas da área. O banco de dados geotérmicos da Bacia de Campos, pertencente ao Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional (LabGeot/ON), era inicialmente composto por 72 medições na região offshore e 13 medições nas áreas onshore adjacentes da bacia, sendo posteriormente ampliado com novos dados ao longo deste estudo. Adicionalmente, foram solicitados e disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) 1.473 novos registros geotérmicos, os quais, quando incorporados ao acervo pré-existente, totalizam 1.544 dados geotérmicos. A ampliação desse conjunto de dados representa um avanço significativo na base informacional disponível, possibilitando análises mais robustas e um refinamento substancial da caracterização térmica da bacia.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

THERMAL CHARACTERISTICS OF THE CAMPOS BASIN, SE BRAZIL AND EVALUATION OF ITS ENERGY RESOURCES

Beatriz Lessa de Jesus

March/2026

The main objective of this study is to identify and characterize distinct crustal thermal structures in the Campos Sedimentary Basin region, located in southeastern Brazil. The Campos Basin plays a significant role in Brazil's oil production, with a current focus on pre-salt sediments. Geothermal studies can aid in understanding the evolutionary processes of sedimentary basins by determining the crustal thermal regime of the continent-ocean transition zone, as is the case with passive margin-type sedimentary basins, and consequently in better understanding the site's exploration potential. To this end, geothermal data from BHT (Bottom Hole Temperature) measurements in deep wells in offshore regions of the basin were incorporated to map the distribution of its geothermal parameters. The incorporation of new data enabled the refinement of the characterization of the thermal state of the crust in the studied basin, allowing for a more detailed analysis of temperature variation as a function of depth. This improvement contributed to a better understanding of crustal thermal processes, reducing uncertainties in existing thermal models and providing more robust support for geological and geophysical interpretations of the area. The geothermal database for the Campos Basin, maintained by the Geothermal Laboratory of the National Observatory (LabGeot/ON), initially consisted of 72 measurements in the offshore region and 13 measurements in the adjacent onshore areas of the basin, which were subsequently expanded with new data throughout this study. Additionally, 1.473 new geothermal records were requested and made available by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), which, when incorporated into the pre-existing dataset, total 1.544 geothermal data points. The expansion of this dataset represents a significant advance in the available information base, enabling more robust analyses and a substantial refinement of the basin's thermal characterization.

Sumário

1 Introdução **1**
1.1 Panorama dos Estudos Geotérmicos da Bacia de Campos 3
1.2 Contextualização da Área de Estudo 6
1.2.1 Bacia sedimentar de Campos 6

2 Área de Estudo **7**
2.1 Localização e Limites 7
2.2 Contexto Geológico Simplificado 8
2.2.1 Estratigrafia 10
2.2.2 Sistema Petrolífero da Bacia de Campos 14
2.2.3 Descontinuidade de Mohorovičić (Moho) 15

3 Banco de Dados Geotérmicos **17**
3.1 Banco de Dados Histórico - LabGeot-ON 18
3.2 Novos Dados Geotérmicos 19
3.3 Dados Oceanográficos 20

4 Metodologia **24**
4.1 Variação Unidimensional Geotérmica na Crosta 24
4.2 Temperatura do Fundo do Mar 25
4.3 Temperatura do Fundo do Poço - BHT 26
4.4 Gradiente Geotérmico 27
4.5 Condutividade Térmica das Rochas 29
4.6 Fluxo de calor 32
4.7 Calor Radiogênico 32
4.8 Distribuição da Temperatura Crustal 35

5 Resultados e Discussão da Distribuição Geotérmica Crustal da Bacia de Campos **38**
5.1 Gradiente Geotérmico 38
5.2 Condutividade Térmica 41
5.3 Fluxo de Calor 43

5.4 Temperatura Crustal e Recursos Energéticos 44
5.4.1 Maturação térmica da matéria orgânica e implicações para o potencial geotérmico 50
5.4.2 Retrofitting 54

6 Considerações Finais **56**

Referências Bibliográficas **58**

Apêndice A: Valores de condutividade térmica por litotipo **68**

Apêndice B: Elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos **70**

Apêndice C: Resultados de Condutividade Térmica para Bacia de Campos **72**

Lista de Figuras

1.1 Representação gráfica da comparação entre fluxo de calor e gradiente geotérmico em diferentes contextos geológicos e bacias sedimentares. Os valores são representativos de médias regionais compiladas a partir da literatura. 5

2.1 Mapa da localização geográfica da porção offshore da bacia de Campos. 7
2.2 Mapa dos domínios crustais do setor meridional da bacia de Campos. Os domínios de crosta estirada/afinada, de crosta continental de maior resistência (alto Externo) e de crosta hiperestendida controlam a distribuição dos principais grábens e das acumulações do Pré-Sal. Os campos do Pré-Sal são indicados para fins de referência geográfica. Figura modificada de (ZALÁN *et al.*, 2020) pela autora. 9
2.3 Carta estratigráfica da Bacia de Campos (parte 1). Fonte: WINTER *et al.* (2007). 11
2.4 Carta estratigráfica da Bacia de Campos (parte 2 – continuação). Fonte: WINTER *et al.* (2007). 12
2.5 Seção geológica regional da Bacia de Campos e suas principais estruturas. O polígono amarelo destaca a região de interesse do estudo, abrangendo águas profundas e ultraprofundas. Modificado de GUARDADO *et al.* (2000). 14

3.1 Localização geográfica dos dados geotérmicos históricos (BDG-BC) do LabGeot-ON. 18
3.2 Gradiente geotérmico da Bacia de Campos calculado a partir dos dados históricos do LabGeot-ON.A interpolação espacial foi realizada pelo método de curvatura mínima, conforme implementado no software Oasis montaj® (Geosoft). 19
3.3 Distribuição do novo banco de dados geotérmico da bacia de Campos compilado.(1.473 novos, 72 do acervo). 20
3.4 Distribuição geográfica dos dados oceanográficos fornecidos pelo BNDO/DHN na Bacia de Campos. 21

3.5 Relação entre profundidade e a temperatura na base da coluna d'água a partir dos dados oceanográficos. 21
3.6 Histograma das temperaturas da base da coluna d'água na Bacia de Campos. A maioria das medições concentra-se entre 18–20°C, indicando homogeneidade térmica da água de fundo e facilitando as correções de temperatura para cálculos de gradiente geotérmico e fluxo de calor. 22
3.7 Relação entre batimetria e a temperatura do assoalho oceânico nos dados oceanográficos utilizados para correções térmicas. 22

4.1 Esquema conceitual das temperaturas de referência utilizadas para o cálculo do gradiente geotérmico (Γ). São representadas a temperatura do fundo do mar (T_{FM}) e a temperatura do fundo do poço corrigida (T_{AAPG}). 28
4.2 Exemplo de perfil litológico de um poço da Bacia de Campos, mostrando as camadas sedimentares e o perfil de condutividade térmica. A linha tracejada representa a condutividade média ponderada (λ_{pond}) das camadas. 30

5.1 Relação entre as temperaturas de fundo de poço medidas (BHT) e corrigidas (BHT-$AAPG$). 39
5.2 Mapa do gradiente geotérmico da Bacia de Campos, obtido a partir de dados de BHT corrigidos e interpolação espacial dos valores de gradiente térmico utilizando o método de mínima curvatura. 40
5.3 Valores mínimo, médio, máximo e desvio padrão do gradiente geotérmico na bacia de Campos. 41
5.4 Mapa de distribuição pontual da condutividade térmica na Bacia de Campos. Os símbolos circulares indicam os locais de amostragem, com cores variando de acordo com a magnitude do parâmetro em $W/(m \cdot K)$. 42
5.5 Mapa atualizado do fluxo de calor da Bacia de Campos. 43
5.6 Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 1 km de profundidade. 45
5.7 Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 2 km de profundidade. 45
5.8 Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 3 km de profundidade. 46
5.9 Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 4 km de profundidade. 46

5.10 Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 5 km de profundidade. 47
5.11 Representação tridimensional das cinco isotermas de temperatura analisadas, correspondentes a diferentes níveis de profundidade, destacando a distribuição espacial do campo térmico. 47
5.12 Variação das temperaturas mínima e média em função da profundidade na Bacia de Campos. A linha tracejada indica o limiar técnico de 150 °C, comumente adotado como referência para sistemas geotérmicos de alta entalpia. 48
5.13 Localização dos quatro poços analisados na Bacia de Campos, destacando sua distribuição espacial nas porções norte, sul, leste e oeste, bem como a classificação relativa dos gradientes geotérmicos (altos e baixos). 51
5.14 Perfis térmicos e campos de entalpia para os quatro poços analisados. 52
5.15 Janelas de maturação térmica da matéria orgânica para os quatro poços analisados, segundo a classificação de TISSOT e WELTE (1984). 53

Lista de Tabelas

1.1 Valores representativos de fluxo de calor e gradiente geotérmico em diferentes contextos geológicos. 4

2.1 Principais unidades litoestratigráficas da Bacia de Campos, com indicação dos grupos, formações, membros e principais características litológicas. 13

2.2 Compilação das profundidades da descontinuidade de Mohorovičić (Moho) para as bacias de Santos e Campos, conforme diferentes estudos publicados em ordem cronológica. Os valores em negrito correspondem à Bacia de Campos. 16

4.1 Valores e parâmetros geotérmicos adotados em modelagens térmicas da crosta continental e da crosta oceânica. A: produção de calor radiogênico ($\mu\mathrm{W\,m^{-3}}$); λ: condutividade térmica ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$); q: fluxo de calor ($\mathrm{mW\,m^{-2}}$). 34

4.3 Valores médios de densidade, abundâncias de elementos radiogênicos (urânio, tório e potássio) e produção volumétrica de calor radiogênico para diferentes domínios da crosta terrestre e do manto superior (CARDOSO e HAMZA, 2014). 34

5.1 Resumo estatístico dos valores de condutividade térmica média ponderada ($\bar{\lambda}_{pond}$) obtidos a partir da integração das espessuras e condutividades térmicas dos litotipos identificados nos perfis litológicos dos poços da Bacia de Campos. 41

5.2 Cálculo da condutividade térmica média ponderada ($\bar{\lambda}_{pond}$) para o poço 1-RJS-0003B-RJ. 42

5.3 Fluxo de calor terrestre em margens passivas. 44

5.4 Síntese das estimativas de temperatura crustal em diferentes profundidades e suas implicações térmicas para a Bacia de Campos. 49

5.5 Fases de maturação térmica da matéria orgânica e intervalos de temperatura, segundo TISSOT e WELTE (1984). 50

5.6 Classificação dos recursos geotermais em função da entalpia, expressa por intervalos de temperatura, segundo MUFFLER e CATALDI (1978). 50

A.1 Valores de condutividade térmica (λ, $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) adotados neste estudo para os diferentes litotipos. 69

B.1 Elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos, com indicação das principais formações, intervalos estratigráficos, características geológicas e profundidades médias. As referências correspondem a: (1) MOHRIAK e SZATMARI (1987); (2) ANP (2023); (3) PETROBRAS (2022); (4) BRUHN e MORAES (2001). 71

C.1 Valores de condutividade térmica média (λ_m, em $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) determinados para cada poço estudado na Bacia de Campos (Poços 248–265). 72

Capítulo 1

Introdução

As propriedades térmicas desempenham papel central na compreensão da geodinâmica da Terra. A temperatura constitui um parâmetro físico fundamental em estudos de fluxo de calor terrestre, além de atuar como indicador complementar para a caracterização das propriedades físicas das rochas (MORAES, 2016). De modo análogo, o entendimento da dinâmica interna e da evolução do planeta depende da investigação dos mecanismos de transferência de calor que ocorrem em seu interior, bem como da caracterização do regime térmico contemporâneo (ALEXANDRINO, 2008; SOUZA, 2006; THOMAZ FILHO *et al.*, 2008).

O calor armazenado e produzido (calor radiogênico) nos materiais sólidos da crosta terrestre configura um recurso natural de energia geotérmica, cuja exploração vem se expandindo em escala global. Nesse contexto, o estudo e o aproveitamento desta energia apresentam-se como alternativas estratégicas, por constituírem uma fonte de energia limpa, renovável e de baixa emissão de poluentes, o que adquire relevância particular em um cenário de crise energética, caracterizado pelo aumento dos custos dos combustíveis fósseis e pelos elevados níveis de poluição atmosférica decorrentes de sua utilização (DIPIPPO, 2012; LUND e BOYD, 2016; TESTER *et al.*, 2006).

No Brasil, a avaliação dos recursos geotérmicos concentra-se prioritariamente em províncias geoestruturais associadas a eventos magmáticos pós-Cenozóicos, em virtude da presença de calor residual em profundidades relativamente rasas na crosta superior. Esse contexto engloba amplos segmentos crustais da Plataforma Continental Brasileira, bem como bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos (HAMZA *et al.*, 2018). A variação da temperatura com a profundidade permite inferir parâmetros geotérmicos essenciais tanto para estudos geodinâmicos quanto para a estimativa do fluxo de calor que vem do interior da Terra e se soma ao calor produzido na litosfera. Em ambientes offshore, a temperatura registrada no fundo do poço durante a perfuração — denominada temperatura de fundo de poço (*BHT*, *bottom hole temperature*) — é utilizada para o cálculo da distribuição unidimen-

sional de temperatura ao longo da profundidade do poço, ou seja, seu gradiente geotérmico. A determinação da temperatura de superfície, fundamental para o estabelecimento do contraste térmico utilizado no cálculo do gradiente geotérmico, é realizada a partir da correção da temperatura do fundo do mar (TFM), levando em conta a espessura da coluna d'água. Esse procedimento é necessário porque a distribuição térmica na interface oceano–crosta pode ser significativamente influenciada pelo relevo batimétrico. Adicionalmente, em função da localização geográfica e da profundidade da lâmina d'água, a temperatura de congelamento da água do mar (TC) pode representar uma condição limite relevante e, portanto, deve ser considerada no processo de correção térmica.

O gradiente geotérmico constitui um parâmetro fundamental na análise geodinâmica de bacias sedimentares, uma vez que subsidia a modelagem da maturação térmica da matéria orgânica em sistemas petrolíferos (MADON e JONG, 2021; TISSOT e WELTE, 1984). Em estudos pioneiros da bacia de Campos, MOHRIAK *et al.* (1989) reportaram que o gradiente geotérmico varia entre 18 e 30 °C/km, com valores médios da ordem de 20–22 °C/km. Posteriormente, com a incorporação de novos dados de *BHT*, CARDOSO e HAMZA (2014) refinaram o mapeamento da distribuição do gradiente geotérmico, identificando intervalos mais elevados, entre 24 e 41 °C/km, e reconhecendo dois domínios térmicos principais: a porção norte da bacia, caracterizada por valores superiores a 34 °C/km, e a porção sul, onde predominam gradientes inferiores a 25 °C/km.

Em associação às propriedades térmicas das rochas, em especial à condutividade térmica, o gradiente geotérmico permite a quantificação do fluxo de calor medido na superfície terrestre. Esse parâmetro constitui uma ferramenta essencial para a caracterização do regime térmico atual e para a avaliação da evolução tectônica regional, além de possibilitar estimativas da subsidência termal associada à dissipação do calor litosférico. o fluxo de calor fornece uma visão integrada do estado térmico crustal, ao refletir conjuntamente as propriedades térmicas das rochas e a arquitetura litosférica, permitindo avaliar o regime térmico regional e sua evolução tectono-termal ao longo do tempo geológico.

Os resultados obtidos neste estudo contribuem para o aprofundamento do entendimento do regime térmico atual da Bacia de Campos e de sua evolução ao longo do tempo geológico. A atualização e o refinamento dos parâmetros térmicos regionais apresentados fornecem subsídios relevantes para a modelagem de sistemas petrolíferos, com ênfase nos processos de maturação da matéria orgânica, geração e migração de hidrocarbonetos. Adicionalmente, esses resultados complementam investigações geofísicas e geodinâmicas previamente conduzidas, contribuindo para a construção de modelos mais robustos de evolução tectono-térmica da região e para a avaliação integrada do potencial energético da bacia.

1.1 Panorama dos Estudos Geotérmicos da Bacia de Campos

A caracterização térmica de bacias sedimentares brasileiras tem sido progressivamente aprimorada ao longo das últimas décadas por meio da análise integrada de gradiente geotérmico e fluxo de calor. Na Bacia de Campos, os primeiros estudos baseados em dados de poços exploratórios estabeleceram um quadro térmico regional compatível com bacias de margem passiva (MOHRIAK *et al.*, 1989). Avanços posteriores, impulsionados pela ampliação do conjunto de medidas de *BHT*, permitiram refinar a distribuição espacial desses parâmetros, evidenciando a existência de contrastes térmicos sistemáticos entre diferentes setores da bacia, em particular entre os domínios norte e sul (CARDOSO e HAMZA, 2014). Investigações mais recentes, como as de MADON e JONG (2021); MORAES (2016), baseadas em medições diretas de fluxo de calor e na caracterização das propriedades térmicas das rochas, têm contribuído de forma substancial para o aprimoramento do entendimento da evolução térmica regional e dos mecanismos de transferência de calor na crosta.

As propriedades térmicas das rochas, em particular a condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica, são parâmetros fundamentais para a determinação quantitativa do fluxo de calor e para a modelagem da distribuição de temperatura em profundidade. Diversos estudos têm empregado abordagens analíticas e numéricas para integrar informações de gradiente geotérmico e propriedades físicas das rochas, viabilizando simulações mais robustas e realistas do regime térmico crustal (CARDOSO e HAMZA, 2014; MORAES, 2016). Tais metodologias têm se mostrado centrais na análise da evolução tectono-termoestratigráfica de bacias sedimentares, bem como na inferência de processos de subsidência e de dissipação de calor na litosfera.

A energia geotérmica, resultante do calor armazenado na crosta terrestre, configura-se como um recurso natural renovável, caracterizado, em geral, por possuir baixo impacto ambiental. Em escala global, sua exploração vem se intensificando, sobretudo em províncias geológicas com gradientes geotérmicos elevados ou com calor residual associado a eventos magmáticos recentes (DIPIPPO, 2012; LUND e BOYD, 2016; TESTER *et al.*, 2006). No contexto brasileiro, diferentes investigações têm reconhecido o potencial para o aproveitamento da energia geotérmica em áreas com atividade magmática pós-Cenozóica e em setores crustais da plataforma continental, incluindo bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos.

A integração de informações geotérmicas e parâmetros de maturação da matéria orgânica é essencial para a modelagem de sistemas petrolíferos. Esses atributos controlam a evolução térmica das rochas geradoras, subsidiam a estimativa da gera-

ção e migração de hidrocarbonetos e permitem a delimitação de isotermas críticas com finalidade exploratória (TISSOT e WELTE, 1984). Conforme discutido por TISSOT *et al.* (1987), a história térmica das bacias sedimentares e os índices de maturação apresentam correlação direta com o gradiente geotérmico e a distribuição de temperaturas na subsuperfície, condicionando os processos cinéticos de geração de óleo e gás. A atualização e o refinamento desses parâmetros têm impactos diretos na avaliação da viabilidade exploratória, na compreensão da evolução térmica em escala regional e na identificação de zonas potencialmente favoráveis à geração e ao aproveitamento de energia geotérmica.

Para contextualizar os distintos ambientes geológicos e suas respectivas condições térmicas, a Tabela 1.1 apresenta valores representativos de fluxo de calor e gradiente geotérmico em diferentes localidades e contextos tectono-sedimentares, incluindo bacias brasileiras e margens continentais internacionais. Verifica-se que, enquanto determinadas bacias sedimentares exibem gradientes geotérmicos relativamente baixos (<25 °C/km), outras áreas, particularmente aquelas associadas a anomalias tectônicas ou a eventos de magmatismo recente, registram valores superiores a 40 °C/km. Esses gradientes geotérmicos elevados sugerem maior potencial para a exploração de recursos geoenergéticos, além de implicarem efeitos significativos sobre a evolução térmica e a maturação de hidrocarbonetos nas respectivas bacias sedimentares.

Tabela 1.1: Valores representativos de fluxo de calor e gradiente geotérmico em diferentes contextos geológicos.

Localidade / Contexto	**Fluxo de calor (mW/m^2)**	**Gradiente geotérmico (°C/km)**	**Referência**
Margem Africana	52-122	35–40	MACGREGOR (2020)
África Ocidental	30-100	–	LUCAZEAU *et al.* (1991)
Norte do Mar do Sul da China	71.8	30–40	SHI *et al.* (2014)
Irlanda	50–55	20–25	JONES e READMAN (2018)
Costa Leste dos EUA	30–49	15–20	BLACKWELL *et al.* (1989)
Bacia de Santos(BRA)	61.9	24.9	DESCOVI (2024)
Bacia de Campos	53.5–66.2	24-34	CARDOSO e HAMZA (2014)
Bacia do Recôncavo(BRA)	73.5 ± 6.7	22	MEISTER e HAMZA (1973)
Bacias com Carbonatos/Evaporitos	–	23	ZEMBRUSCKI (1989)
Bacia do Rio Jequitinhonha(BRA)	70–115	∼40	HAMZA e CARDOSO (2017)
Margem Continental Brasileira (Anomalias)	–	∼40	HAMZA *et al.* (2018)

Apesar dos avanços recentes, ainda existem grandes lacunas na caracterização do

regime térmico da Bacia de Campos e de outras bacias sedimentares brasileiras. As incertezas nas correções de *BHT*, as heterogeneidades laterais no gradiente geotérmico e a necessidade de integrar propriedades físico-petrofísicas das rochas ressaltam a importância de estudos adicionais. Esta pesquisa procurou refinar os mapas de distribuição de gradiente geotérmico e de fluxo de calor com a integração de novos dados *BHTs* distribuídos em toda a bacia, oferecendo bases mais robustas para a modelagem de sistemas petrolíferos e para a avaliação do potencial de energia geotérmica na região. Além disso, a reavaliação da condutividade térmica, estimada a partir dos perfis litológicos e das espessuras dos respectivos pacotes estratigráficos, permitiu calcular valores médios ponderados mais representativos da composição das formações geológicas. Esse procedimento resultou em uma estimativa mais consistente da condutividade térmica ao longo da bacia, contribuindo para a redução da variabilidade lateral anteriormente observada nesse parâmetro.

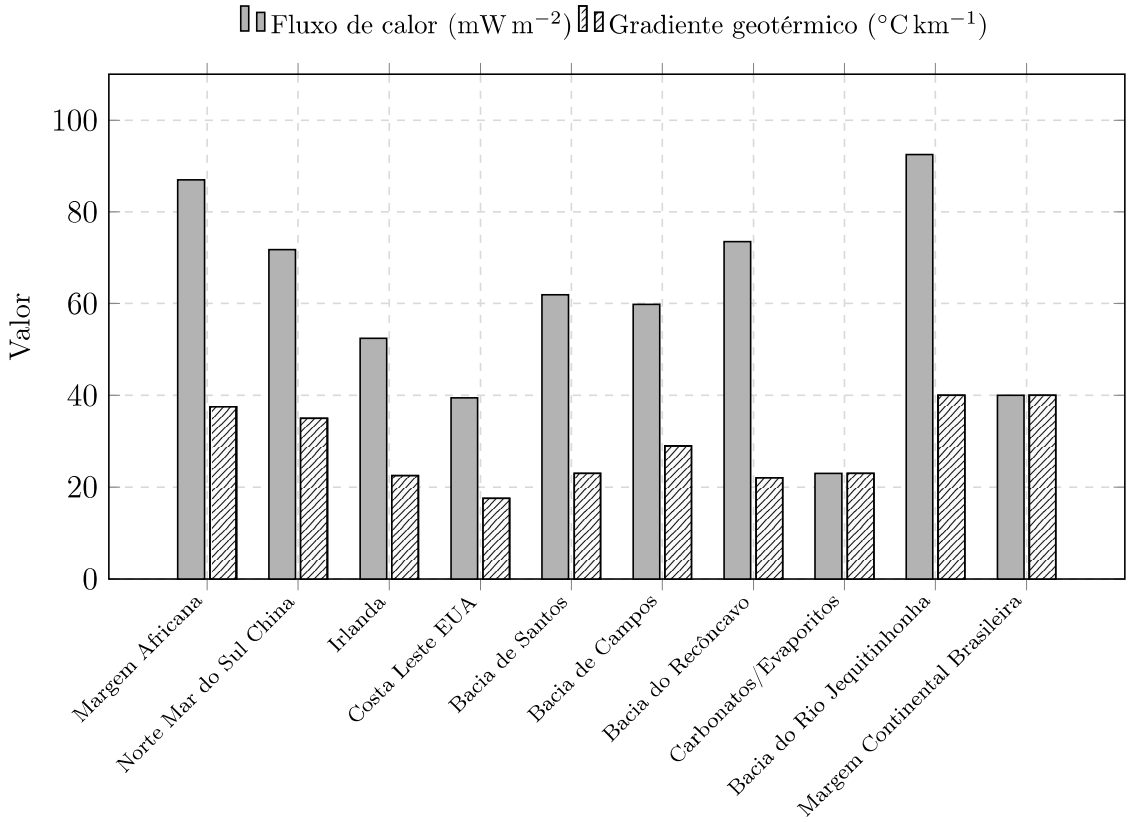


Figura 1.1: Representação gráfica da comparação entre fluxo de calor e gradiente geotérmico em diferentes contextos geológicos e bacias sedimentares. Os valores são representativos de médias regionais compiladas a partir da literatura.

1.2 Contextualização da Área de Estudo

1.2.1 Bacia sedimentar de Campos

A Bacia de Campos é uma das bacias sedimentares mais significativas do Brasil, localizada na porção sudeste do país e abrangendo áreas onshore e offshore do estado do Rio de Janeiro. Sua extensão aproxima-se de 100.000 km^2, com profundidades que variam de alguns metros em terra firme até mais de 2.000 metros na plataforma continental (CARDOSO e HAMZA, 2014; CONTRERAS *et al.*, 2010).

Bacias sedimentares correspondem a regiões subsidentes da crosta terrestre, capazes de acumular sedimentos ao longo de extensos intervalos geológicos. Esses depósitos, predominantemente sedimentares, configuram ambientes propícios à geração e acumulação de hidrocarbonetos, sendo de elevada relevância estratégica para a indústria de petróleo e gás, além de constituírem áreas de interesse para estudos de geodinâmica e exploração de energia geotérmica (BEGLINGER *et al.*, 2012; CARDOSO e HAMZA, 2014; CONTRERAS *et al.*, 2010).

A Bacia de Campos apresenta padrões tectônicos e de subsidência que controlam o fluxo de calor crustal, influenciando diretamente o potencial geotérmico regional. Uma análise detalhada das propriedades térmicas e geotérmicas torna-se, portanto, essencial para compreender a evolução tectono-sedimentar da bacia, subsidiar a modelagem de sistemas petrolíferos e contribuir para a avaliação sustentável de seus recursos energéticos (CARDOSO e HAMZA, 2014; CARDOSO, 2007; CONTRERAS *et al.*, 2010).

Além disso, estudos geotérmicos em bacias sedimentares de margens passivas permitem determinar o regime térmico da crosta na zona de transição entre continente e oceano (GHOLAMREZAIE *et al.*, 2018; HYNDMAN e DAVIS, 1982; KOLAWOLE e EVENICK, 2023; LACHENBRUCH e SASS, 1977). Tais estudos possibilitam estimar as temperaturas atuais das camadas portadoras de hidrocarbonetos e avaliar os efeitos da difusão lateral de calor, fenômeno que influencia a distribuição do fluxo térmico e o gradiente geotérmico local (CHAPMAN, 1986; CUNHA *et al.*, 2021; GHOLAMREZAIE *et al.*, 2018; JESSOP, 1990).

Capítulo 2

Área de Estudo

2.1 Localização e Limites

Localizada na margem leste do litoral brasileiro, especificamente na região sudeste do país, a Bacia de Campos abrange áreas cujas águas territoriais pertencem as unidades federativas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Ao norte, a bacia é limitada pelo Alto de Vitória e, ao sul, pelo Alto de Cabo Frio, estruturas tectônicas que funcionam como barreiras naturais à deposição sedimentar, influenciando significativamente a configuração estrutural da bacia (CONTRERAS *et al.*, 2010; DE CASTRO e PICOLINI, 2015).

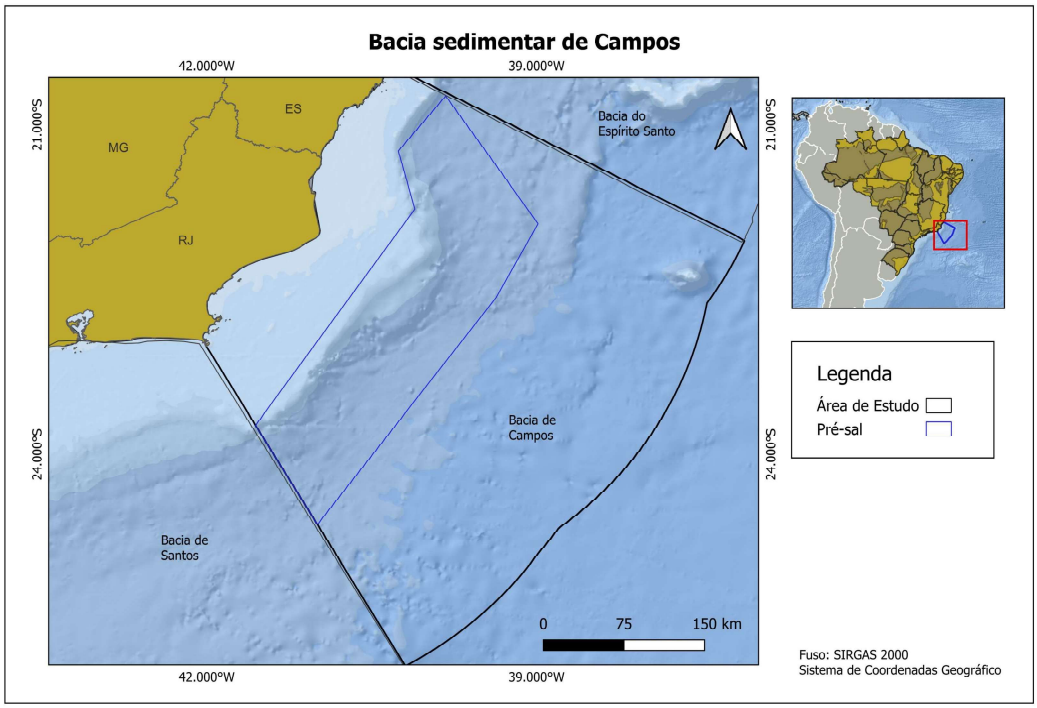


Figura 2.1: Mapa da localização geográfica da porção offshore da bacia de Campos.

2.2 Contexto Geológico Simplificado

Estudos geodinâmicos conduzidos na Bacia de Campos, como os de MOHRIAK e SZATMARI (1987), que utilizam perfis de gravidade e sísmica de reflexão profunda, evidenciam um estiramento litosférico continental, característico de bacias de margem divergente. Esse contexto geotectônico extensional está associado à separação das placas Sul-Americana e Africana (DIAS *et al.*, 1990; THOMAZ FILHO *et al.*, 2000; WINTER *et al.*, 2007). A partir do final do Triássico, a abertura e a expansão do fundo oceânico do Atlântico Sul ocorreram progressivamente de sul para norte, promovendo ressurgência mantélica e aumento da atividade tectônica regional (MOHRIAK e SZATMARI, 2008).

Segundo ZALÁN *et al.* (2020, 2011), a Bacia de Campos, assim como a Bacia de Santos, desenvolveu-se sobre a crosta continental intensamente estirada durante a abertura do Atlântico Sul. A caracterização do arcabouço estrutural da margem sudeste brasileira indica que a crosta subjacente encontra-se compartimentada em três grandes domínios estruturais, aproximadamente paralelos à linha de costa.

No sentido offshore proximal–distal, esses domínios compreendem: (i) um domínio interno de crosta estirada a hiperestendida; (ii) um domínio de resistência continental, caracterizado por crosta relativamente mais espessa e menor grau de afinamento; e (iii) um domínio externo de crosta hiperestendida. Esses compartimentos são separados por um cinturão contínuo de manto exumado, que representa a transição progressiva entre a crosta continental e a crosta oceânica (Figura 2.2).

Os dados sísmicos regionais indicam que essa transição estrutural é marcada pela ocorrência de altos vulcânicos externos, interpretados como estruturas basálticas associadas aos estágios finais da ruptura continental e ao início da instalação de uma crista mesoatlântica embrionária (QUIRK *et al.*, 2013).

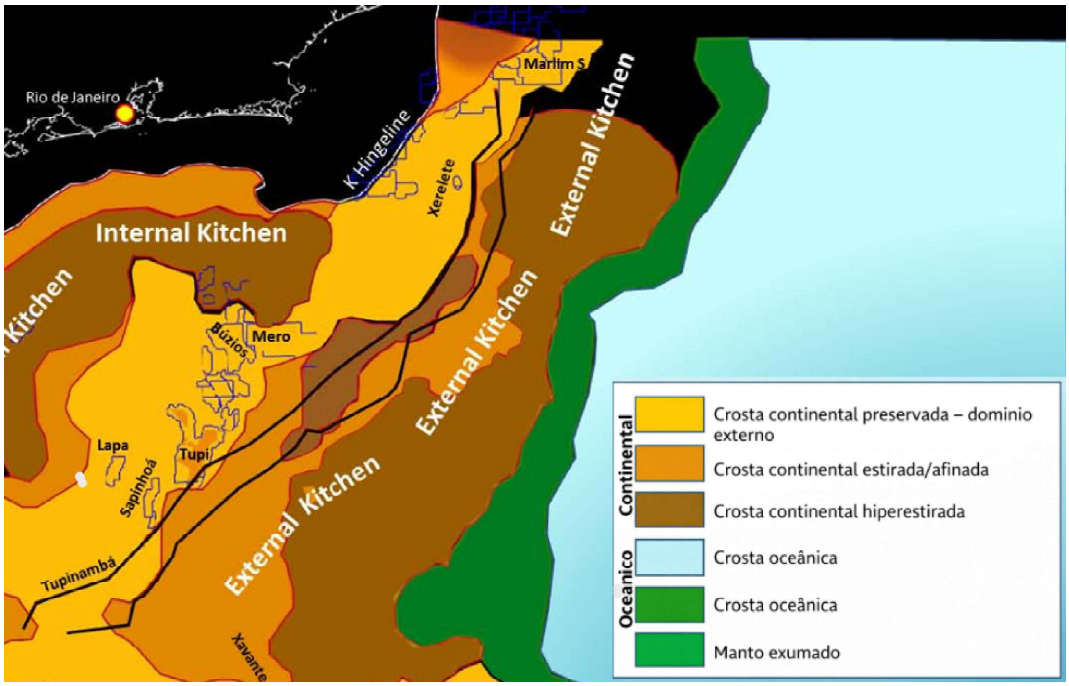


Figura 2.2: Mapa dos domínios crustais do setor meridional da bacia de Campos. Os domínios de crosta estirada/afinada, de crosta continental de maior resistência (alto Externo) e de crosta hiperestendida controlam a distribuição dos principais grábens e das acumulações do Pré-Sal. Os campos do Pré-Sal são indicados para fins de referência geográfica. Figura modificada de (ZALÁN *et al.*, 2020) pela autora.

A transição crosta continental–oceânica é bem delimitada e apresenta continuidade ao longo da margem sudeste brasileira, estendendo-se da bacia de Santos até a bacia do Espírito Santo (ZALÁN *et al.*, 2011). Essa organização crustal reflete a evolução termo-tectônica da margem passiva e constitui um fator de controle fundamental sobre a distribuição das propriedades térmicas e sobre o regime geotérmico das bacias sedimentares.

Em escala estratigráfica e estrutural, a evolução da bacia de Campos pode ser subdividida em dois domínios principais:

- Domínio rifte: caracterizado por sistemas de blocos rotacionais, limitados por falhas normais de orientação predominantemente NE–SW, envolvendo diretamente o embasamento cristalino (DIAS *et al.*, 1990; GUARDADO *et al.*, 1989);

- Domínio pós-rifte: marcado pela presença de estruturas salíferas, cujas movimentações provavelmente tiveram início no Albiano, com o desenvolvimento de sistemas de escorregamento do tipo *raft* que segmentaram a plataforma carbonática (MILANI e THOMAZ FILHO, 2000).

2.2.1 Estratigrafia

Conforme descrito por WINTER *et al.* (2007) e DE CASTRO e PICOLINI (2015), a Bacia de Campos pode ser subdividida em três grandes unidades tectono-sedimentares (Figuras 2.3 e 2.4):

- Rifte;
- Transicional (drifte inicial);
- Margem passiva (drifte final).

A organização estratigráfica da bacia reflete a interação entre os processos tectônicos, a evolução térmica da litosfera e os ambientes deposicionais ao longo de sua história geológica. As unidades formadas durante a fase rifte são fortemente controladas pela compartimentação estrutural do embasamento, enquanto as sucessões transicionais e de margem passiva registram a progressiva estabilização tectônica e o estabelecimento de ambientes marinhos abertos.

Com base na carta estratigráfica apresentada nas Figuras 2.3 e 2.4, a Tabela 2.1 sintetiza as principais unidades litoestratigráficas da Bacia de Campos, destacando os grupos, formações e membros, bem como suas características litológicas e deposicionais mais relevantes.

As unidades litoestratigráficas apresentadas na Tabela 2.1 exercem um papel fundamental na configuração dos elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos. Os depósitos lacustres e os folhelhos orgânicos do Grupo Lagoa Feia, formados durante a fase rifte, constituem as principais rochas geradoras. As sucessões carbonáticas e siliciclásticas dos Grupos Macaé e Campos concentram os principais intervalos reservatório, enquanto as camadas evaporíticas e os folhelhos marinhos pós-rifte atuam como selos regionais eficazes, controlando a preservação e a compartimentação dos hidrocarbonetos.

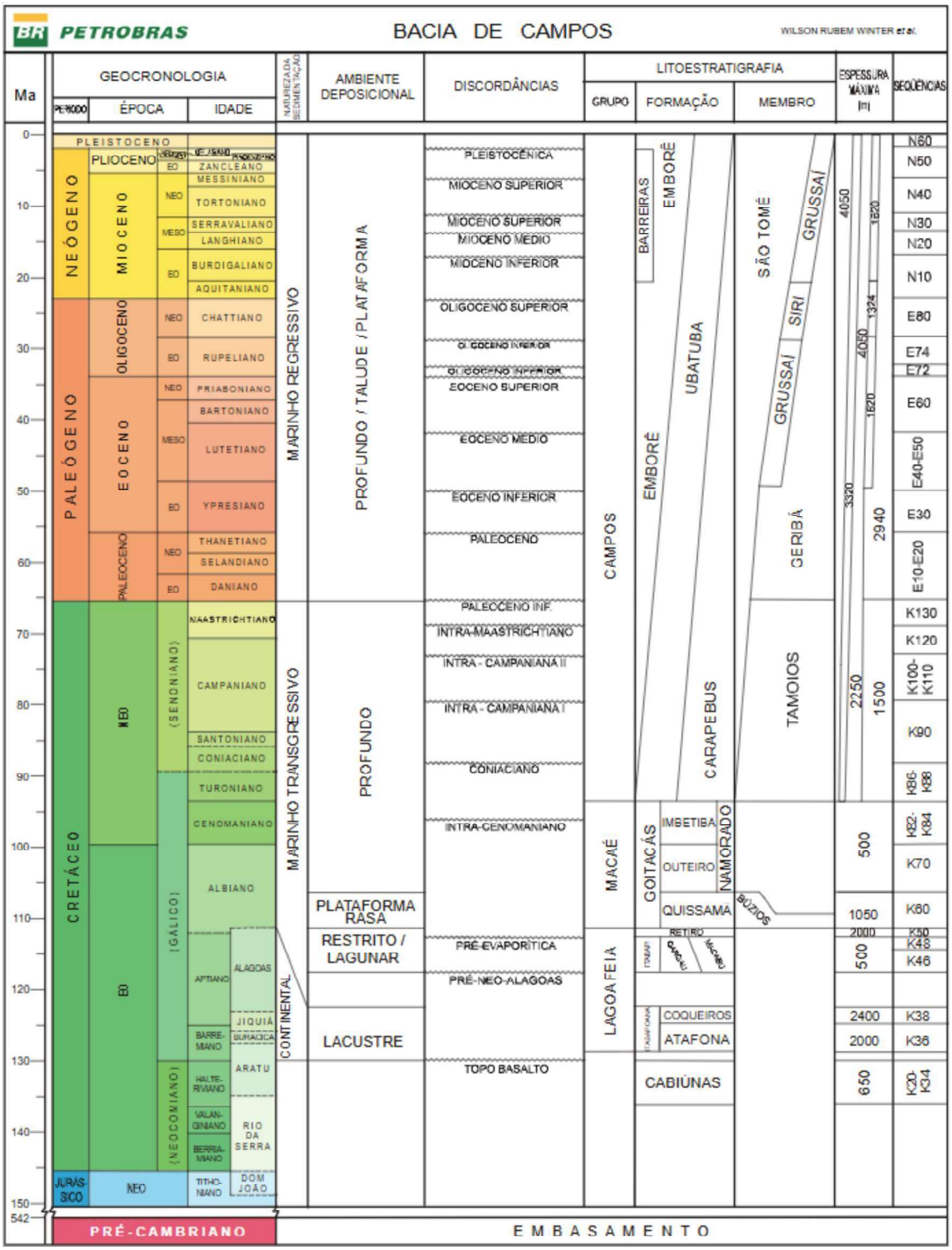


Figura 2.3: Carta estratigráfica da Bacia de Campos (parte 1). Fonte: WINTER *et al.* (2007).

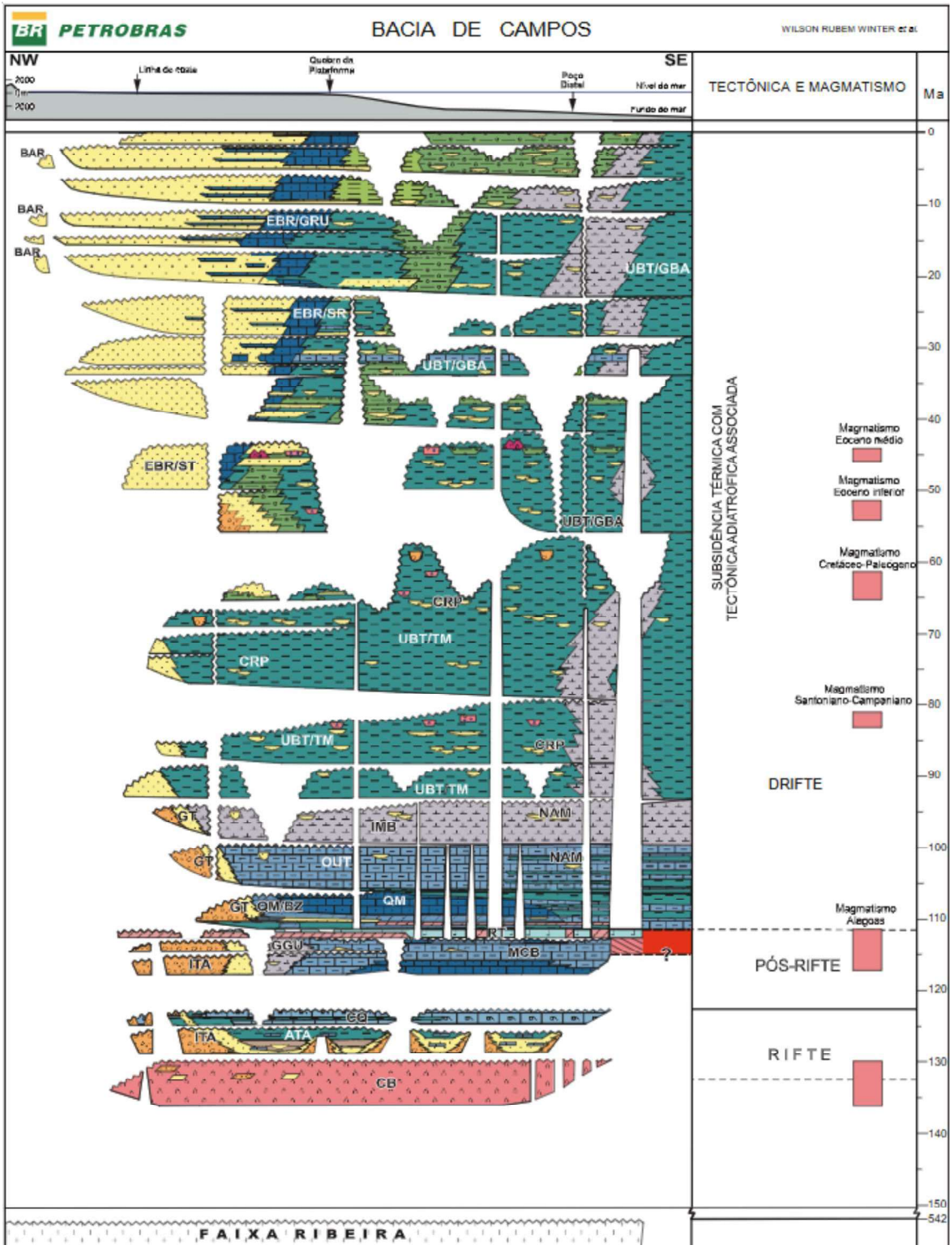


Figura 2.4: Carta estratigráfica da Bacia de Campos (parte 2 – continuação). Fonte: WINTER *et al.* (2007).

Tabela 2.1: Principais unidades litoestratigráficas da Bacia de Campos, com indicação dos grupos, formações, membros e principais características litológicas.

Grupo	Formação	Membro	Descrição
Lagoa Feia	Coqueiros	–	Basaltos associados à fase inicial do rifteamento continental (GUARDADO *et al.*, 2000).
	Itapemirim	Siri	Sedimentos lacustres e fluviais depositados em ambiente continental (MILANI *et al.*, 2007).
		Taquari	Folhelhos e siltitos ricos em matéria orgânica, com elevado potencial gerador (CHANG *et al.*, 1992).
Macaé	Quissamã	–	Rochas carbonáticas bioclásticas e calcilutitos depositados em ambiente marinho raso, associados à fase transicional (GUARDADO *et al.*, 2000).
	Imbetiba	–	Margas e calcários intercalados, indicativos de condições marinhas progressivamente mais profundas (MILANI *et al.*, 2007).
	Outeiro	–	Depósitos siliciclásticos turbidíticos associados a ambientes de talude continental (CHANG *et al.*, 1992).
Campos	Carapebus	–	Sedimentos marinhos profundos dominados por processos gravitacionais e fluxos de massa (GUARDADO *et al.*, 2000).
	Ubatuba	–	Areias e siltes depositados em talude continental e planície submarina (MILANI *et al.*, 2007).
	Namorado	Caratinga	Arenitos turbidíticos de granulometria fina a média, com boa qualidade de reservatório (CHANG *et al.*, 1992).
		Marlim	Arenitos grossos intercalados com folhelhos, associados a sistemas turbidíticos profundos (GUARDADO *et al.*, 2000).
		Albacora	Sequências arenosas turbidíticas com elevada porosidade e permeabilidade (MILANI *et al.*, 2007).

O embasamento da bacia exerceu influência direta sobre as feições tectono-sedimentares das sequências rifte e transicional, favorecendo a formação de baixos

deposicionais e altos estruturais. O drifte final foi condicionado pela interação entre a compartimentação estrutural, a subsidência térmica crustal (MOHRIAK *et al.*, 1989) e os movimentos halocinéticos. Como resultado, três domínios estruturais podem ser distinguidos na bacia: distensional, translacional e compressional (Figura 2.5), os quais exercem controle direto sobre a geometria dos reservatórios e a distribuição das acumulações de hidrocarbonetos (DE CASTRO e PICOLINI, 2015).

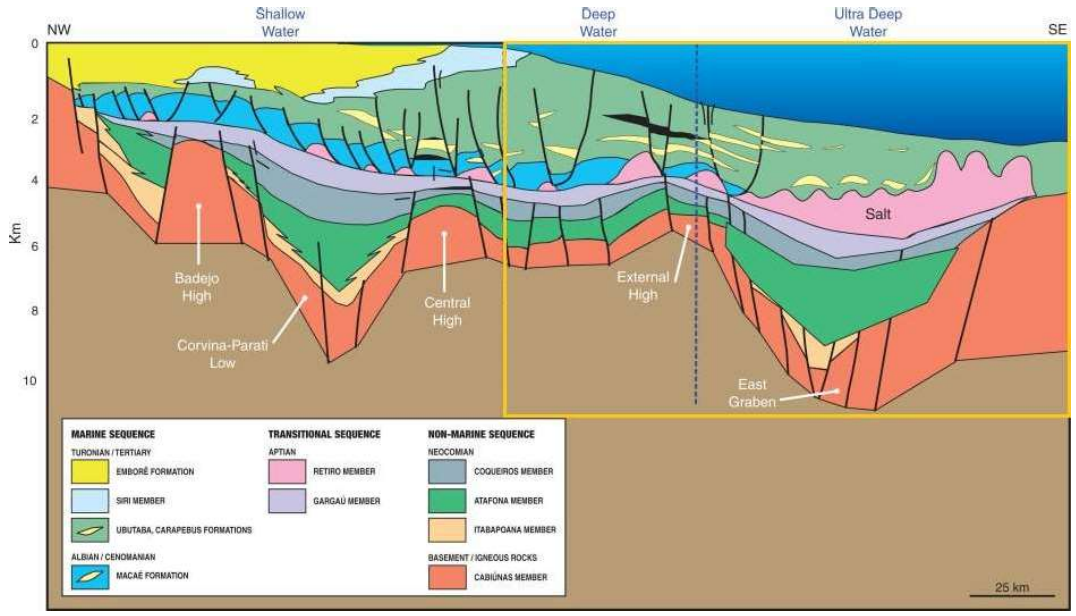


Figura 2.5: Seção geológica regional da Bacia de Campos e suas principais estruturas. O polígono amarelo destaca a região de interesse do estudo, abrangendo águas profundas e ultraprofundas. Modificado de GUARDADO *et al.* (2000).

De acordo com MIZUSAKI *et al.* (1992), a margem passiva onde se insere a Bacia de Campos apresenta magmatismo toleítico registrado em duas fases principais: uma durante o Cretáceo (≈145–66 Ma) e outra no Terciário Inicial, atualmente denominado Paleógeno (≈66–23 Ma). Os basaltos de inundação da fase pré-rifte representam uma extensão mais jovem do vulcanismo da Província do Paraná, enquanto o magmatismo pós-rifte caracteriza-se por intrusões próximas ao limite crustal e por cunhas de refletores mergulhantes em direção ao oceano (MOHRIAK, 2003). Esses eventos magmáticos desempenham um papel relevante na história térmica da bacia.

2.2.2 Sistema Petrolífero da Bacia de Campos

A caracterização de um sistema petrolífero depende fortemente do conhecimento geológico, uma vez que permite identificar rochas geradoras, reservatórios e selantes, bem como falhas e dobras que atuam como armadilhas estruturais, muitas vezes associadas aos processos de rifteamento (ANP, 2023; BRUHN e MORAES, 2001; MOHRIAK e SZATMARI, 2008; PETROBRAS, 2022). No caso da Bacia de Cam-

pos, o sistema petrolífero é considerado altamente produtivo, sendo referência para estudos de exploração no Brasil.

A Formação Lagoa Feia, do Cretáceo Inferior (≈145–113 Ma), constitui a principal rocha geradora da Bacia de Campos, sendo composta por folhelhos ricos em matéria orgânica do tipo I (GUARDADO *et al.*, 1989). Além disso, ao norte, no limite com a Bacia do Espírito Santo, há registros de folhelhos marinhos datados do Cenomaniano–Turoniano (≈100–90 Ma), que também são considerados potenciais rochas geradoras (ANP, 2017).

Os reservatórios variam conforme as fases tectono-sedimentares da bacia — rifte, sag e drifte. Durante a fase rifte, observam-se basaltos fraturados e vesiculares da Formação Cabiúnas, bem como coquinas da Formação Coqueiros, que, localmente, apresentam condições favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. A fase sag apresenta reservatórios carbonáticos microbianos, típicos do sistema pré-sal, desenvolvidos predominantemente durante o Aptiano (≈125–113 Ma). Na fase drifte, predominam calcarenitos e carbonatos de alta energia, além de turbiditos depositados ao longo do Cretáceo Superior (≈100–66 Ma) e do Paleógeno (≈66–23 Ma), que desempenham um papel significativo na produção total de óleo na bacia (ANP, 2017).

As rochas selantes podem ser agrupadas em dois conjuntos principais: camadas de sal de idade Aptiana (≈125–113 Ma) e folhelhos marinhos depositados do Albiano ao Eoceno (≈113–34 Ma), responsáveis pela contenção de hidrocarbonetos nos sistemas pré-sal e pós-sal, respectivamente (ANP, 2017; BRUHN e MORAES, 2001; MOHRIAK e SZATMARI, 2008). A síntese detalhada dos elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos, incluindo formações, intervalos estratigráficos, principais características geológicas e profundidades médias, é apresentada no Apêndice B.1. Essa compilação tem caráter complementar na interpretação das características térmicas da bacia.

2.2.3 Descontinuidade de Mohorovičić (Moho)

A Descontinuidade de Mohorovičić (Moho), descoberta em 1909, representa a interface limite entre a crosta terrestre e o manto superior, identificado por mudanças abruptas na velocidade das ondas sísmicas. O conhecimento de sua profundidade e distribuição espacial é fundamental para compreender a estrutura crustal e a evolução geodinâmica de uma região (XU *et al.*, 2024).

A espessura da crosta terrestre varia conforme a densidade e o tipo de rocha que a compõe, sendo geralmente mais espessa na porção continental e mais fina na oceânica (LASKE *et al.*, 2013). Consequentemente, a profundidade do Moho é afetada pela localização geográfica, variando tipicamente entre 20 e 70 km em áreas

continentais e entre 10 e 15 km em áreas oceânicas (CHRISTENSEN e MOONEY, 1995).

No contexto da bacia de Campos, estudos prévios indicam profundidades de Moho variando aproximadamente entre 15 e 36 km, conforme compilado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Compilação das profundidades da descontinuidade de Mohorovičić (Moho) para as bacias de Santos e Campos, conforme diferentes estudos publicados em ordem cronológica. Os valores em negrito correspondem à Bacia de Campos.

Fonte	**Bacia de Santos (km)**	**Bacia de Campos (km)**
Mohriak et al. (2010)	13–36	**15–33**
Scotchman et al. (2010)	14–38	**16–34**
Zalán et al. (2011)	13–36	**14–30**
Evain et al. (2015)	14–38	–
Constantino et al. (2016b)	14–38	–
Uieda & Barbosa (2017)	14–31	**15–36**
Stanton et al. (2019)	13–39	**17–32**
Xu et al. (2024)	15–38	**17–31**
Plawiak et al. (2025)	14–37	**16–33**

O conhecimento da Descontinuidade de Mohorovičić (Moho) é fundamental para a interpretação geodinâmica de uma região, pois a espessura da crosta influencia diretamente a história tectônica local. Em áreas de crosta continental mais espessa, a Moho tende a se localizar a maiores profundidades, resultando em um fluxo de calor relativamente menor, uma vez que a crosta funciona como um isolante térmico. Por outro lado, em regiões de crosta oceânica mais fina, a Moho encontra-se mais próxima da superfície térmica do manto, o que favorece fluxos de calor mais elevados (MCKENZIE *et al.*, 2005).

Dessa forma, a determinação da profundidade do Moho na Bacia de Campos, em conjunto com a análise do fluxo de calor, permite compreender o regime térmico regional e suas variações estruturais. Esses dados são essenciais para a modelagem geotérmica, a estimativa de gradientes térmicos e a avaliação do comportamento térmico da bacia, fornecendo subsídios importantes para estudos de maturação de hidrocarbonetos e avaliação de recursos energéticos.

Capítulo 3

Banco de Dados Geotérmicos

O banco de dados geotérmicos utilizado neste estudo foi construído a partir da integração de informações provenientes de investigações anteriores, pertencentes ao acervo do Laboratório de Geotermia do Observatório Nacional (LabGeot–ON), de acesso público, e de novos dados obtidos junto a instituições oficiais, notadamente a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e a Petrobras. Essa base de dados integrada permite o processamento e a interpretação detalhada do regime térmico da Bacia de Campos, fornecendo suporte quantitativo para análises de fluxo de calor, gradiente geotérmico e avaliação do potencial geotérmico regional.

O acervo compilado reúne informações fundamentais para a determinação dos principais parâmetros térmicos da bacia, incluindo:

- registros de temperatura em subsuperfície obtidos por meio de medições diretas em poços (*Bottom Hole Temperature* – BHT);
- gradientes geotérmicos calculados e estimados a partir dos dados de temperatura;
- estimativas ponderadas de condutividade térmica das principais formações geológicas, derivadas da análise dos perfis litológicos dos poços;
- valores de fluxo geotérmico;
- estimativas de produção de calor radiogênico;
- profundidade máxima investigada em cada poço;
- lâmina d'água;
- dados batimétricos.

As informações de batimetria foram obtidas junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (BNDO/DHN), assegurando consistência espacial e compatibilidade com os dados geotérmicos utilizados nas análises.

3.1 Banco de Dados Histórico - LabGeot-ON

Trabalhos anteriores, como os de CARDOSO (2007), VIEIRA e HAMZA (2014) e HAMZA *et al.* (2018), utilizaram informações geotérmicas do acervo do LabGeot-ON. O banco de dados histórico da Bacia de Campos incluía 72 registros offshore (Figura 3.1).

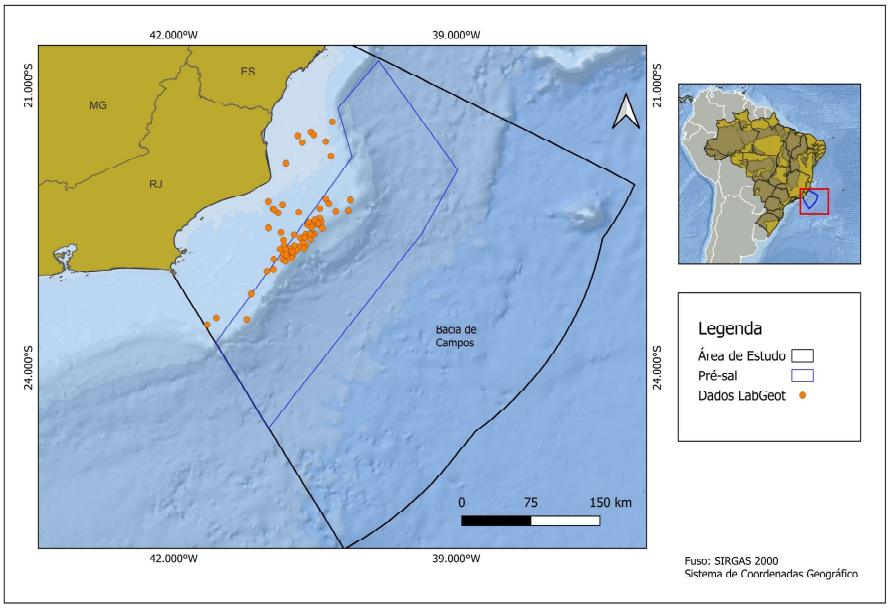


Figura 3.1: Localização geográfica dos dados geotérmicos históricos (BDG-BC) do LabGeot-ON.

A distribuição desses dados possibilitou o mapeamento inicial do gradiente geotérmico da bacia, limitado em grande parte à zona de transição continente-oceano (talude), enquanto a região petrolífera do Pré-Sal não foi totalmente coberta (Figura 3.2).

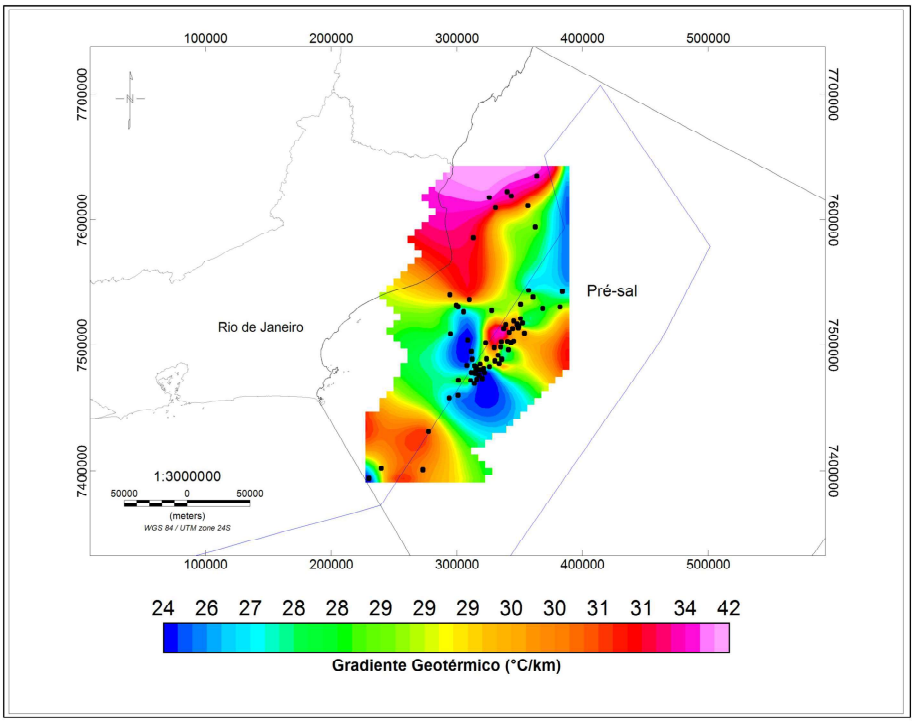


Figura 3.2: Gradiente geotérmico da Bacia de Campos calculado a partir dos dados históricos do LabGeot-ON.A interpolação espacial foi realizada pelo método de curvatura mínima, conforme implementado no software Oasis montaj® (Geosoft).

3.2 Novos Dados Geotérmicos

Os novos dados geotérmicos utilizados neste estudo foram obtidos em colaboração com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no âmbito do Projeto Multifísica ON–LGA/Petronas. O conjunto de dados compreende mais de 2.700 registros de perfilagens de poços distribuídos ao longo da Bacia de Campos. As informações de interesse incluem medições de temperatura ao longo do perfil dos poços e/ou no fundo do poço (*Bottom Hole Temperature* – BHT), parâmetros fundamentais para a estimativa dos gradientes geotérmicos e do fluxo de calor.

O processo de filtragem e seleção dos dados foi realizado de forma criteriosa e manual, em virtude da ausência de padronização e da indisponibilidade de parte das informações em formato digital estruturado. Após essa etapa, 1.544 registros foram considerados adequados e incorporados às análises, por apresentarem informações completas e consistentes. Os demais registros foram descartados em função da presença de lacunas, inconsistências ou incertezas nos dados essenciais para os cálculos geotérmicos.

Embora os registros estejam majoritariamente concentrados na porção centro-oeste do polígono do Pré-Sal, a incorporação desse novo conjunto de dados permitiu

um refinamento substancial dos mapas geotérmicos previamente disponíveis. Esse aprimoramento resultou em maior resolução espacial e confiabilidade nas interpretações do regime térmico e na avaliação do potencial geotérmico da Bacia de Campos.

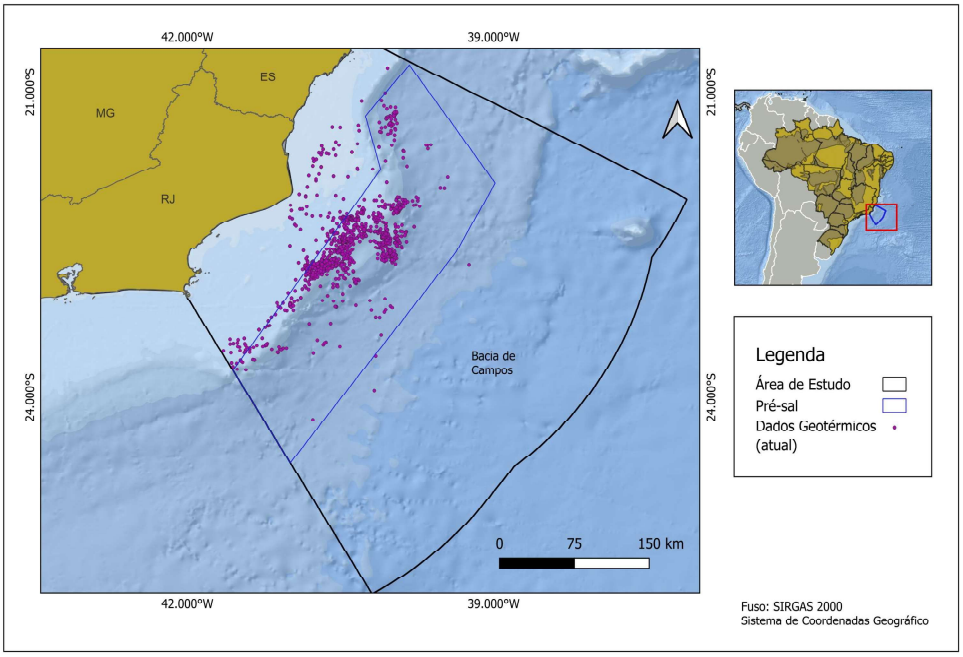


Figura 3.3: Distribuição do novo banco de dados geotérmico da bacia de Campos compilado.(1.473 novos, 72 do acervo).

3.3 Dados Oceanográficos

Conforme citado anteriormente, as informações oceanográficas utilizadas neste estudo foram obtidas junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (BNDO/DHN), totalizando 729 registros distribuídos na Bacia de Campos. Esses dados incluem informações de batimetria e de temperatura da coluna d'água e foram empregados com a finalidade de refinar o cálculo do gradiente geotérmico a partir de dados *BHT* em ambiente offshore.

Em áreas marinhas, a temperatura de referência superficial (T_0) não pode ser assumida como a temperatura na interface ar–mar, uma vez que a temperatura varia significativamente ao longo da espessura da lâmina d'água. Dessa forma, os dados oceanográficos, em conjunto com a batimetria, foram utilizados para estimar, por meio de ajustes apropriados, a temperatura na base da lâmina d'água. Essa estimativa de T_0 na interface água–sedimento permite corrigir adequadamente os dados geotérmicos e obter valores mais representativos do gradiente geotérmico nos poços offshore.

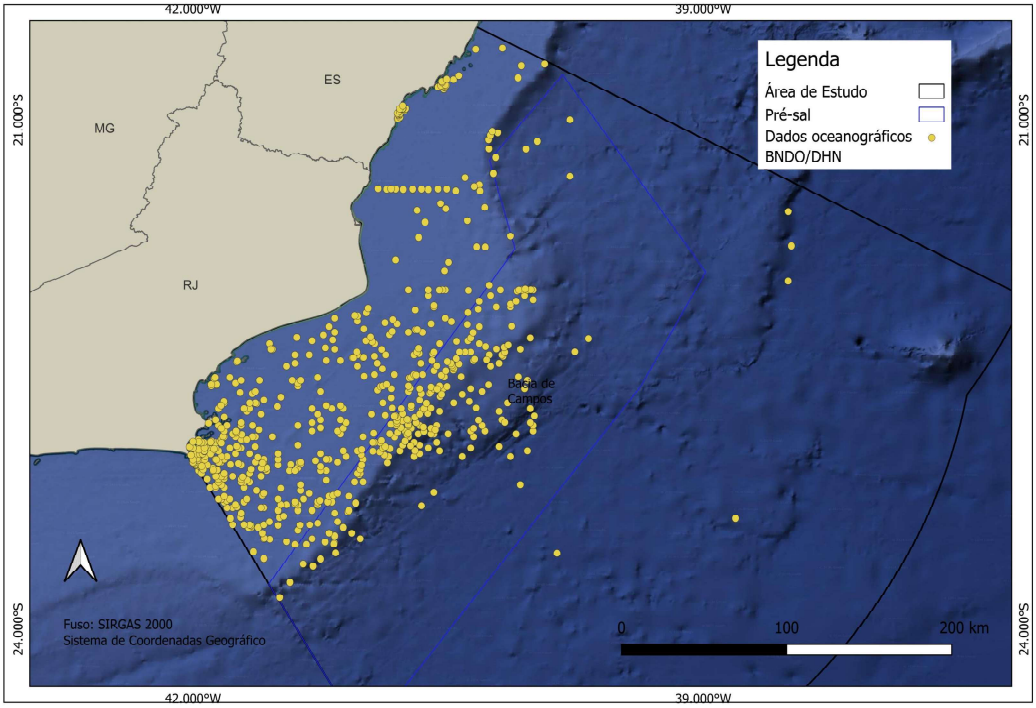


Figura 3.4: Distribuição geográfica dos dados oceanográficos fornecidos pelo BNDO/DHN na Bacia de Campos.

O gráfico da Figura 3.5 mostra a relação empírica entre a profundidade e a temperatura na base da coluna de água (BWT - *bottom water temperature*). A partir dessa relação, foram calculadas as temperaturas BWT na plataforma, permitindo correções nos dados adquiridos no fundo do poço.

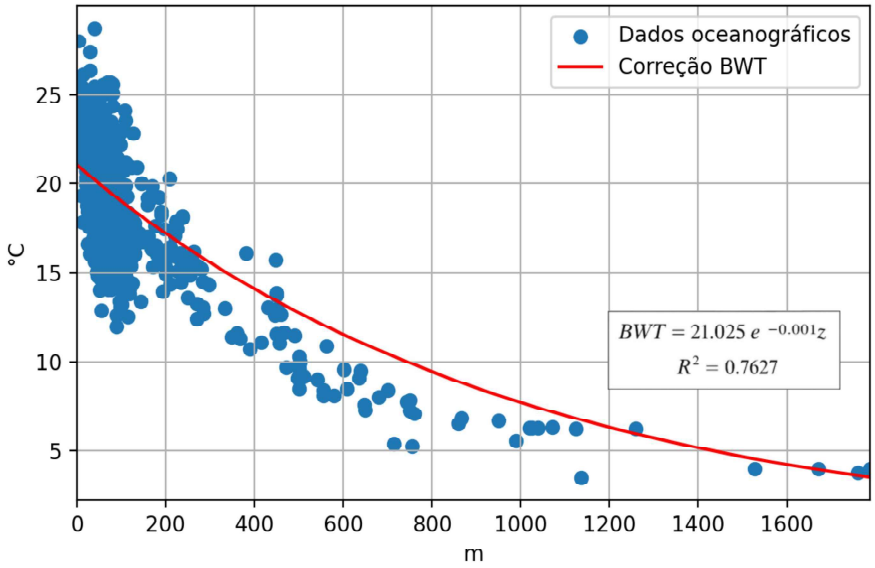


Figura 3.5: Relação entre profundidade e a temperatura na base da coluna d'água a partir dos dados oceanográficos.

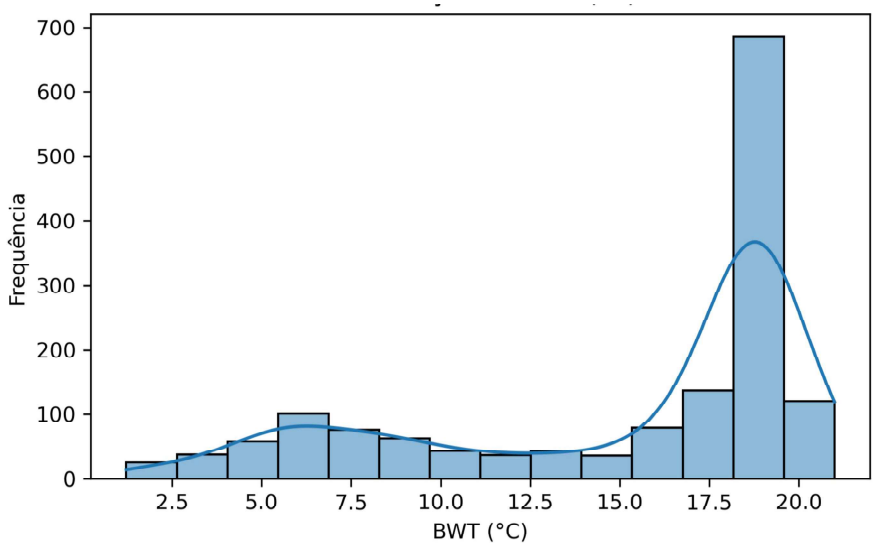


Figura 3.6: Histograma das temperaturas da base da coluna d'água na Bacia de Campos. A maioria das medições concentra-se entre 18–20°C, indicando homogeneidade térmica da água de fundo e facilitando as correções de temperatura para cálculos de gradiente geotérmico e fluxo de calor.

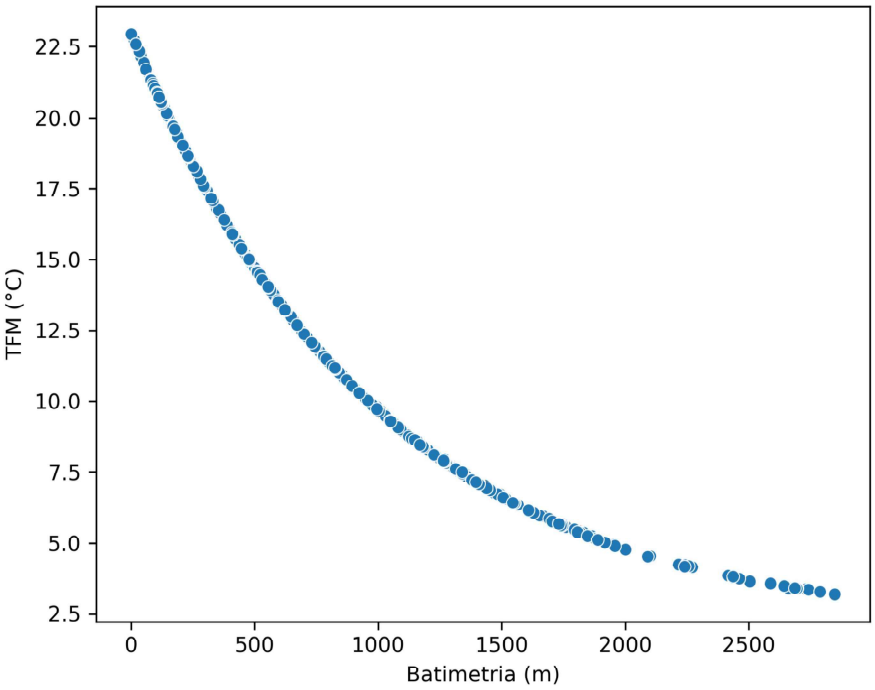


Figura 3.7: Relação entre batimetria e a temperatura do assoalho oceânico nos dados oceanográficos utilizados para correções térmicas.

A análise conjunta das Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 permite avaliar o comportamento térmico das águas de fundo na região da Bacia de Campos. A distribuição das temperaturas de BWT (Figura 3.6) apresenta concentração predominante no intervalo entre 18 e 20 °C, indicando relativa homogeneidade térmica da água de fundo na

área analisada. Essa característica é importante, pois contribui para a aplicação de correções térmicas mais consistentes nos cálculos do gradiente geotérmico e do fluxo de calor.

A relação entre batimetria e TFM (Figura 3.7) evidencia que a temperatura decresce à medida que a profundidade aumenta, refletindo o padrão térmico típico do ambiente oceânico, no qual as águas superficiais são aquecidas pela radiação solar e as águas profundas apresentam temperaturas progressivamente mais baixas. Observa-se um decréscimo mais acentuado nos primeiros 500–1000 m, seguido por uma tendência à estabilização abaixo de aproximadamente 2000 m, o que caracteriza a presença de uma termoclina, correspondente à zona de transição entre águas quentes e frias. Nas maiores profundidades, em torno de 2500–2800 m, as temperaturas situam-se entre 2 e 5 °C, representando águas de fundo frias, possivelmente associadas à atuação de correntes oceânicas profundas e à circulação termohalina.

Esses resultados são coerentes com as descrições clássicas do perfil térmico oceânico (STEWART, 2008; TALLEY *et al.*, 2011), nas quais a termoclina é marcada por gradientes térmicos elevados nos primeiros milhares de metros da coluna d'água. As temperaturas mínimas observadas em grandes profundidades refletem a influência de massas de água profundas frias, relacionadas à circulação oceânica global (ORSI *et al.*, 1999). Do ponto de vista geotérmico, as variações térmicas observadas são relevantes, uma vez que a temperatura da água de fundo constitui um parâmetro fundamental para a correção das medidas de temperatura em poços submarinos, impactando diretamente as estimativas de gradiente geotérmico e fluxo de calor (CARDOSO e HAMZA, 2014; HAMZA e MUÑOZ, 1996).

Capítulo 4

Metodologia

4.1 Variação Unidimensional Geotérmica na Crosta

O modelo geotérmico crustal é adotado neste estudo como uma ferramenta quantitativa para a caracterização do regime térmico litosférico da Bacia de Campos, permitindo a estimativa integrada do seu gradiente geotérmico e do fluxo de calor. Essa abordagem é particularmente adequada em bacias sedimentares, onde a distribuição de temperatura em profundidade é fortemente condicionada pelas propriedades térmicas das rochas e pelas condições de contorno impostas ao sistema.

A variação do gradiente geotérmico reflete as propriedades termofísicas do contexto geológico estudado e pode ser avaliada a partir de medições de temperatura obtidas ao longo de um perfil em profundidade. No caso, utilizamos medidas de temperatura realizadas ao longo de poços profundos utilizados para prospecção de hidrocarboneto, são as temperaturas denominadas *BHTs*. A relação entre temperatura e profundidade, associada a valores representativos de condutividade térmica presentes na crosta terrestre, fornece a base para o cálculo do fluxo de calor, que expressa a eficiência da crosta no processo de transferência de energia térmica.

A construção do modelo unidimensional térmico crustal baseou-se em medições *BHT*, profundidades finais das perfurações e descrições litológicas das unidades sedimentares. Esse conjunto de informações foi organizado de modo a representar o estado térmico atual da bacia, em consonância com seu arcabouço estratigráfico e estrutural.

As informações de temperatura foram submetidas a procedimentos de correção destinados a minimizar os efeitos não geológicos associados às condições de aquisição dos dados. As temperaturas da base da coluna d'água foram ajustadas de modo a representar o ambiente térmico do fundo marinho, enquanto as medições de *BHT* foram tratadas para minimizar a influência de perturbações térmicas associadas às operações de perfuração. Esses ajustes conferem maior consistência física às

estimativas do gradiente geotérmico.

Os perfis litológicos permitiram a atribuição de propriedades termofísicas às unidades estratigráficas, a condutividade térmica média sendo estimada por meio de ponderação em função das espessuras das camadas relativas. As temperaturas corrigidas ao longo da profundidade definiram a variação térmica vertical, a partir da qual foram calculados os valores de fluxo de calor.

Esses resultados constituem a base para a determinação das temperaturas crustais e para a avaliação integrada das características térmicas e do potencial geotérmico da bacia de Campos, fornecendo subsídios para interpretações sobre a transferência de calor na crosta sedimentar e sua evolução térmica.

4.2 Temperatura do Fundo do Mar

Em ambientes offshore, informações oceanográficas são fundamentais para construção de modelos geofísicos interpretativos, em especial a temperatura da água e a espessura de sua coluna d'água. A variação da temperatura no assoalho oceânico não é uniforme entre os diferentes contextos oceânicos, uma vez que colunas d'água mais espessas tendem a apresentar temperaturas mais baixas do que aquelas associadas a menores profundidades, em função da menor incidência de radiação solar e da atuação de processos oceanográficos.

O perfil de temperatura ao longo da coluna de água caracteriza-se, em geral, por uma diminuição progressiva com a profundidade. A diferença entre as temperaturas superficial e na base da coluna d'água varia em função da região, as correntes oceânicas, de outros fatores geográficos e oceanográficos, influenciando diretamente a definição da temperatura de referência utilizada nos cálculos do gradiente geotérmico..

Assim, ao analisar dados oceanográficos, é necessário considerar essas variações de temperatura em diferentes profundidades e realizar correções apropriadas para caracterizar corretamente o perfil térmico da coluna de água. Neste estudo, foram desenvolvidas relações empíricas entre a lâmina d'água (Z) e a temperatura na base da coluna de água (BWT - *bottom water temperature*).Com base nos dados oceanográficos obtidos, apresentados na Seção 3.3 e representados no gráfico da Figura 3.5, a Equação que melhor ajustou os dados da Bacia de Campos foi:

$$BWT = 21.025^{-0,001z} \tag{4.1}$$

Conforme CARDOSO (2007), a temperatura da água do mar é utilizada como parâmetro de correção dos dados de temperatura na porção inferior da coluna d'água, em poços que dispõem de informações sobre a lâmina d'água, de modo a reduzir

distorções térmicas associadas ao ambiente oceânico. Vale salientar que, conforme discutido por BEARDSMORE e CULL (2001), a temperatura na base da coluna d'água (BWT) pode diferir da Temperatura do Fundo do Mar (T_{FM}) no Atlântico. Essa diferença está associada principalmente às variações batimétricas e à topografia oceânica, que controlam a circulação e a estratificação das massas d'água em grandes profundidades. Em determinados contextos, esses processos podem resultar em temperaturas muito baixas, próximas ou inferiores a 0 °C, relacionadas à temperatura de congelamento da água do mar (T_C). Conforme FOLDVIK e KVINGE (1974), T_C pode ser estimada pela Equação (4.2):

$$T_C = -1.90 - 7.64 \times 10^{-4}\, z \tag{4.2}$$

Desse modo, em ambientes offshore, a temperatura do assoalho oceânico (T_{FM}) é adotada como equivalente à temperatura superficial (T_0), sendo z definido como a profundidade da lâmina d'água, isto é, a distância vertical entre a superfície do mar e o assoalho oceânico. De acordo com BEARDSMORE e CULL (2001), a determinação de T_{FM} requer a correção da temperatura medida na base da coluna d'água (*Bottom Water Temperature* – BWT), estabelecendo sua relação com a temperatura de congelamento da água do mar (T_C), conforme expressa a Equação 4.3.

$$T_{FM} = BWT - T_C \tag{4.3}$$

4.3 Temperatura do Fundo do Poço - BHT

A temperatura do fundo do poço (BHT) corresponde à temperatura registrada no fundo do poço de exploração ou ao longo de seu trajeto, sendo geralmente medida durante a perfuração, logo após a interrupção da circulação da lama. A água ou lama utilizada nesse processo desempenha uma função dupla, atuando no resfriamento da broca e no transporte dos detritos gerados até a superfície. Em função dessas condições operacionais, os valores de BHT não representam diretamente as temperaturas reais em regime estacionário, podendo estar superestimados ou subestimados em razão do caráter transiente do campo térmico no momento da medição (MRAIDI *et al.*, 2021). Ainda assim, essas medidas constituem a principal base para a determinação das temperaturas crustais e para a avaliação das características térmicas e do potencial geotérmico da bacia.

Dessa forma, as medidas BHT requerem correção em razão das perturbações térmicas induzidas pela perfuração, associadas principalmente a dois mecanismos: o aquecimento, relacionado ao atrito entre a broca e a formação rochosa, e o resfriamento, decorrente da diferença de temperatura entre o fluido de perfuração injetado

e a rocha (CARDOSO, 2007).

A influência relativa desses processos varia com a profundidade. Em pequenas profundidades, tende a predominar o aquecimento, resultando em elevação da temperatura registrada. Em maiores profundidades, o resfriamento passa a ser dominante, uma vez que a circulação dos fluidos supera o efeito do aquecimento.

O restabelecimento do equilíbrio térmico exigiria um período de interrupção da perfuração aproximadamente dez vezes superior ao tempo de perfuração propriamente dito (LACHENBRUCH, 1959), tornando essa condição impraticável em operações industriais. Entre os métodos de correção disponíveis, o proposto pela American Association of Petroleum Geologists ($AAPG$) (KEHLE *et al.*, 1970) mostrou-se mais adequado neste estudo, por não depender de informações detalhadas sobre o histórico de perfuração e do tempo.

O método de correção de temperatura $AAPG$ considera a magnitude da correção (ΔT), a profundidade final do poço (z) e quatro coeficientes polinomiais, a, b, c e d, cujos valores são 1,878 $\times$ 10^{-3} °C/m, 8,476 $\times$ 10^{-7} °C/m^2, 5,091 $\times$ 10^{-11} °C/m^3 e 1,681 $\times$ 10^{-14} °C/m^4, respectivamente. A partir desses parâmetros, a correção da BHT é obtida conforme apresentado nas Equações 4.4 e 4.5 a seguir:

$$\Delta T = az + bz^2 - cz^3 - dz^4 \tag{4.4}$$

$$\Delta T = T_{AAPG} - T_{BHT} \tag{4.5}$$

A aplicação desse procedimento envolve a organização dos dados de temperatura e profundidade, seguida do cálculo da anomalia térmica associada às perturbações induzidas pela perfuração. A correção é então aplicada diretamente aos valores de BHT, resultando na temperatura corrigida (T_{AAPG}). Esses valores corrigidos são utilizados como dados de entrada para o cálculo do gradiente geotérmico e para as demais análises térmicas desenvolvidas neste estudo.

4.4 Gradiente Geotérmico

O gradiente geotérmico (Γ) expressa a taxa de variação da temperatura em função da profundidade na crosta terrestre, sendo usualmente apresentado em °C/km. Trata-se de um parâmetro central na caracterização do regime térmico da subsuperfície, pois sintetiza a resposta térmica integrada da coluna sedimentar e constitui a base para estimativas de fluxo de calor e interpretações geológicas associadas.

O gradiente geotérmico é calculado a partir da razão entre a variação de temperatura e a variação de profundidade entre dois níveis de referência, conforme a Equação 4.6:

$$\Gamma = \frac{T_{final} - T_{inicial}}{Z_{final} - Z_{inicial}} = \frac{T_{AAPG} - T_{FM}}{Z - Z_0} \tag{4.6}$$

em que T_{final} corresponde à temperatura no nível mais profundo, representada pela *Bottom-Hole Temperature* corrigida (T_{AAPG}), enquanto $T_{inicial}$ refere-se à temperatura de referência superficial, assumida como a temperatura do fundo do mar (T_{FM}). As variáveis Z e Z_0 representam, respectivamente, a profundidade do ponto inferior e a profundidade associada à superfície de referência.

A Figura 4.1 apresenta um esquema conceitual das temperaturas e profundidades consideradas no cálculo do gradiente geotérmico, evidenciando a diferença térmica entre o fundo do poço corrigido e a superfície offshore. Esse contraste térmico, associado ao intervalo vertical correspondente, fundamenta a estimativa do gradiente ao longo da coluna sedimentar na bacia de Campos.

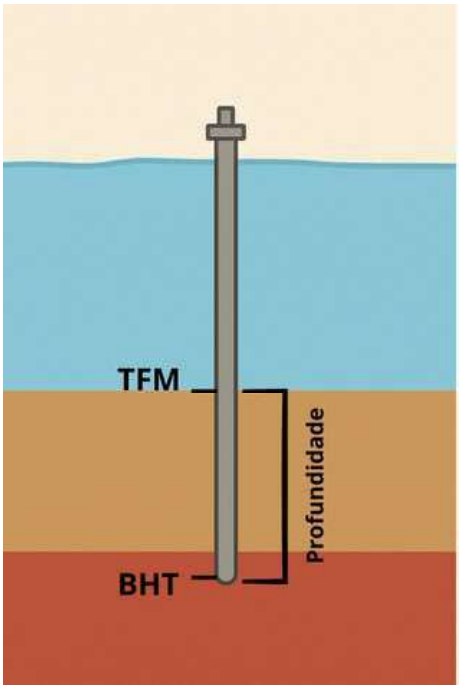


Figura 4.1: Esquema conceitual das temperaturas de referência utilizadas para o cálculo do gradiente geotérmico (Γ). São representadas a temperatura do fundo do mar (T_{FM}) e a temperatura do fundo do poço corrigida (T_{AAPG}).

O gradiente geotérmico obtido a partir das temperaturas corrigidas expressa a variação térmica vertical da coluna sedimentar e é um parâmetro fundamental para a caracterização do regime térmico da subsuperfície. Os valores estimados são posteriormente empregados na determinação do fluxo de calor e nas análises do regime térmico crustal, fornecendo subsídios para a interpretação dos processos de transferência de calor e para a avaliação do potencial geotérmico.

4.5 Condutividade Térmica das Rochas

A condutividade térmica (λ) é um parâmetro termofísico que quantifica a capacidade de um material em conduzir calor, expresso em $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ (DIPIPPO, 2012; LUND e BOYD, 2016). Esse parâmetro depende intrinsecamente da composição mineralógica das rochas e, portanto, apresenta variação significativa ao longo de perfis litológicos que contêm camadas com diferentes litotipos e espessuras (CARDOSO e HAMZA, 2014; MORAES, 2016).

Neste estudo, os valores de condutividade térmica utilizados foram obtidos a partir de médias previamente publicadas, específicas para cada litotipo e compatíveis com o contexto geológico da região. Para cada perfil de poço, esses valores foram atribuídos aos principais litotipos identificados, considerando agrupamentos de unidades geológicas com características petrofísicas e tectônicas semelhantes. Essa estratégia visa reduzir possíveis distorções nos parâmetros térmicos, embora não elimine totalmente a possibilidade de variações.

A confiabilidade dos resultados é ampliada pela utilização da média aritmética ponderada das espessuras dos pacotes sedimentares presentes nos perfis litológicos dos poços (MOHRIAK e SZATMARI, 1987). Essa média incorpora a relação entre diferentes litotipos e os processos de condução de calor no meio geológico, sendo calculada conforme Equação 4.7:

$$\bar{\lambda}_{pond} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} e_i} \tag{4.7}$$

onde λ_i representa a condutividade térmica da i-ésima camada, e_i a espessura correspondente e n o número total de camadas identificadas no perfil litológico (Figura 4.2) (GUIMARÃES *et al.*, 2022).

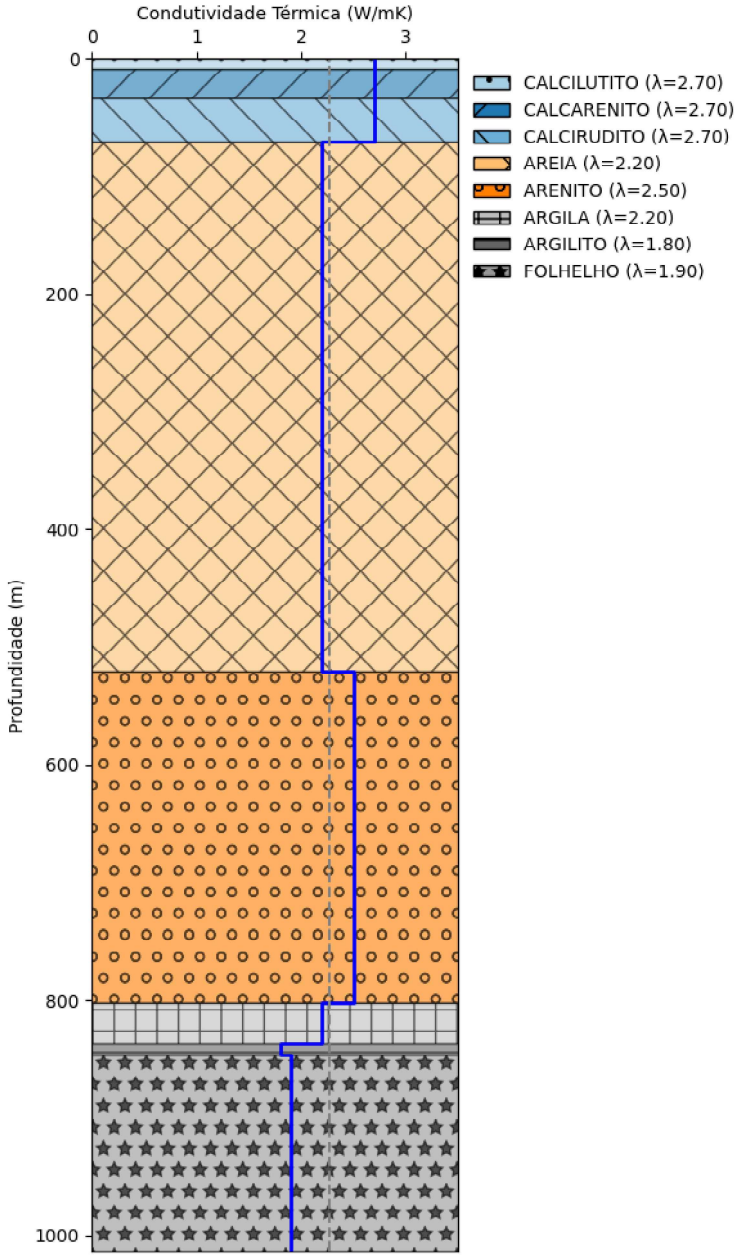


Figura 4.2: Exemplo de perfil litológico de um poço da Bacia de Campos, mostrando as camadas sedimentares e o perfil de condutividade térmica. A linha tracejada representa a condutividade média ponderada (λ_{pond}) das camadas.

O procedimento metodológico adotado para a determinação da condutividade térmica das rochas sedimentares está resumido a seguir:

1. Caracterização litológica dos poços: a partir da análise dos perfis litológicos disponíveis na literatura (MOHRIAK e SZATMARI, 1987; MORAES, 2016), foram identificadas as unidades estratigráficas e os respectivos litotipos presentes em cada poço, bem como as espessuras individuais dos pacotes sedimentares (e_i).

2. Atribuição de valores de condutividade térmica: para cada litotipo identificado, foram atribuídos valores de condutividade térmica (λ_i) com base em compilações clássicas e estudos consolidados sobre propriedades térmicas de rochas sedimentares (DIPIPPO, 2012; TESTER *et al.*, 2006).

3. Cálculo da condutividade térmica média ponderada: a condutividade térmica média das sequências sedimentares foi estimada por meio da média ponderada das espessuras das camadas.

4. Integração nos modelos geotérmicos: o valor obtido de condutividade térmica média ponderada foi utilizado como parâmetro de entrada nos modelos de fluxo de calor e temperatura crustal, contribuindo para a caracterização térmica regional da bacia (CARDOSO e HAMZA, 2014; LUND e BOYD, 2016).

Os valores de condutividade térmica atribuídos a cada litotipo foram extraídos de trabalhos previamente publicados, assegurando coerência física e metodológica com modelos geotérmicos aplicados à margem continental sudeste brasileira (CARDOSO e HAMZA, 2014; SOUZA, 2006; THOMAZ FILHO *et al.*, 2008). Para os litotipos *calcarenito*, *calcissiltito*, *carnalita* e *tilito*, para os quais não foram encontrados valores pontuais na bibliografia consultada, foram adotados intervalos típicos associados a grupos litológicos equivalentes, conforme proposto por SCHÖN (2015). Para efeito de cálculo, foi empregado o valor médio de cada faixa.

Adicionalmente, foram considerados os intervalos de condutividade térmica reportados por VIEIRA e HAMZA (2014) para a bacia de Campos, obtidos a partir da análise integrada de dados geotérmicos regionais e das propriedades físicas das formações sedimentares. Esses intervalos refletem de forma mais representativa as condições térmicas locais da margem continental sudeste brasileira, sendo utilizados como referência comparativa e como critério de validação dos parâmetros adotados neste estudo.

A tabela completa contendo os valores de condutividade térmica utilizados neste trabalho, discriminados por litotipo e respectivas referências bibliográficas, é apresentada no Apêndice A.

4.6 Fluxo de calor

O fluxo de calor corresponde à taxa de transferência de energia térmica através de um meio, geralmente expressa em watts (W). Já a densidade de fluxo de calor (q) representa essa taxa normalizada por unidade de área, podendo ocorrer por processos de condução ou advecção, sendo usualmente expressa em $\mathrm{W/m^2}$(BEARDSMORE e CULL, 2001; DAVIS e FISHER, 2020). No presente estudo, considera-se apenas o fluxo de calor de natureza condutiva, calculado como o produto entre o gradiente geotérmico e a condutividade térmica da formação (DAVIS e FISHER, 2020), conforme apresentado na Equação 4.8 abaixo:

$$q = -\lambda_{med}\Gamma \tag{4.8}$$

em que q representa o vetor fluxo de calor ($\mathrm{mW/m^2}$), λ corresponde à condutividade térmica do material ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) e Γ expressa o gradiente de temperatura (°C/km), ou seja, a variação espacial da temperatura.

Observa-se que o fluxo térmico varia inversamente com a profundidade, onde nessa formulação, o sinal negativo indica a direção natural do fluxo de calor, que se desloca das regiões mais quentes para as mais frias, em consonância com a Segunda Lei da Termodinâmica. Entretanto, quando se trabalha apenas com a magnitude do vetor fluxo, esse sinal é desconsiderado, assim como possíveis perdas laterais, assumindo-se um regime predominantemente unidimensional.

Nesse contexto, o fluxo de calor é calculado adotando-se um regime estacionário, compatível com as variações térmicas de grande escala na crosta. Essa abordagem permite aplicar diretamente a relação condutiva clássica apresentada por SCLATER *et al.* (2014). Vale ressaltar que embora exista uma distinção conceitual entre os termos, é comum na literatura que "fluxo de calor" e "densidade de fluxo de calor" sejam utilizados como sinônimos (DAVIS e FISHER, 2020).

4.7 Calor Radiogênico

O calor radiogênico constitui uma das principais fontes de calor da Terra, sendo produzido a partir do decaimento dos principais radionuclídeos naturais presentes na crosta terrestre. Dessa forma, sua geração encontra-se diretamente relacionada à distribuição de temperatura no interior da crosta terrestre (POLLACK *et al.*, 1993; RYBACH, 1976).

Em regiões continentais estáveis, o calor radiogênico representa uma parcela significativa da contribuição para o fluxo de calor observado, sobretudo em áreas pouco afetadas por eventos tectônicos ou magmáticos recentes. Esse comportamento

está associado à elevada concentração de elementos radioativos na crosta superior, onde se concentra a maior parte da produção radiogênica (STOBER e BUCHER, 2021b).

De modo geral, considera-se que a produção de calor radiogênico é predominantemente concentrada na crosta superior e decresce progressivamente com a profundidade, evidenciando uma distribuição vertical não homogênea. Assim, sua influência térmica tende a ser mais expressiva nas porções rasas e intermediárias da crosta continental (RYBACH, 1976; STOBER e BUCHER, 2021b).

Os valores e parâmetros geotérmicos adotados para as modelagens térmicas da crosta continental e oceânica estão apresentados na Tabela 4.1. Na crosta continental, a produção de calor radiogênico é relativamente significativa devido à abundância de urânio, tório e potássio, resultando em fluxos de calor típicos entre 40 e 70 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$ (POLLACK *et al.*, 1993; RUDNICK e FOUNTAIN, 1995; RYBACH, 1976; SCHÖN, 2015; STOBER e BUCHER, 2021a; TURCOTTE e SCHUBERT, 2014). A condutividade térmica varia de 2,5 a 3,5 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ e a espessura crustal está entre 30 e 45 km, de modo que a produção radiogênica crustal é a principal fonte de calor.

No caso da crosta oceânica, a influência do calor radiogênico é considerada secundária, uma vez que essa crosta é relativamente empobrecida em urânio, tório e potássio, apresentando composição predominantemente basáltica. Como pode ser observado na Tabela 4.1, em comparação com a crosta continental, a crosta oceânica possui menor espessura (6–7 km) e baixa produção de calor radiogênico, geralmente inferior a 0,5 $\mathrm{\mu W\,m^{-3}}$, podendo ser considerada desprezível (RUDNICK e FOUNTAIN, 1995; RYBACH, 1976; SCHÖN, 2015; STOBER e BUCHER, 2021b). Dessa forma, o fluxo de calor oceânico é controlado principalmente pelos fenômenos físico-químicos associados à formação e evolução das rochas, bem como pelo resfriamento do manto litosférico subjacente (TURCOTTE e SCHUBERT, 2014). À medida que a crosta oceânica se afasta das dorsais e evolui, o fluxo de calor decresce progressivamente, mantendo uma contribuição radiogênica mínima (POLLACK *et al.*, 1993).

Tabela 4.1: Valores e parâmetros geotérmicos adotados em modelagens térmicas da crosta continental e da crosta oceânica. A: produção de calor radiogênico ($\mu\mathrm{W\,m^{-3}}$); λ: condutividade térmica ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$); q: fluxo de calor ($\mathrm{mW\,m^{-2}}$).

Parâmetro	**Crosta continental**	**Crosta oceânica**
A	1.0–3.0 (crosta superior)	< 0.5
λ	2.5–3.5	2.0–2.8
q	40–70	60–100 (dependente dos processos físico-químicos da crosta)
Espessura crustal (km)	30–45	6–7
Principal fonte de calor	Produção radiogênica crustal	Calor mantélico

Segundo ZALÁN *et al.* (2011), a crosta continental associada às bacias de Campos, Santos e Espírito Santo registra um regime tectônico marcado por estiramento e afinamento crustal, característico de margens continentais passivas. Nesse contexto, a crosta superior, de comportamento predominantemente frágil, apresenta evidências de estiramento mais intenso nas porções proximais ao continente, abrangendo desde águas rasas até águas profundas, com profundidades de até aproximadamente 2000 m.

Tabela 4.3: Valores médios de densidade, abundâncias de elementos radiogênicos (urânio, tório e potássio) e produção volumétrica de calor radiogênico para diferentes domínios da crosta terrestre e do manto superior (CARDOSO e HAMZA, 2014).

Domínio	**Densidade** ($\mathrm{kg\,m^{-3}}$)	**U** (ppm)	**Th** (ppm)	**K** (%)	**Produção de calor** ($\mu\mathrm{W\,m^{-3}}$)
Crosta continental	2650	2.3	8.1	1.84	1.30
Crosta oceânica	2800	0.8	2.7	0.60	0.48
Manto superior	3500	0.006	0.02	0.03	0.0043

Em contraste, nas regiões mais distais da margem, correspondentes a domínios de águas ultraprofundas, com profundidades superiores a 2000 m, o afinamento crustal torna-se mais pronunciado, refletindo uma maior contribuição de processos extensivos associados à evolução termo-mecânica da margem continental. Essa diferenciação espacial no estilo de deformação crustal tem implicações diretas sobre a distribuição das propriedades térmicas e sobre o regime térmico regional das bacias sedimentares.

Neste trabalho, a produção de calor radiogênico crustal, embora seja relativamente baixa na Bacia de Campos, foi modelada por uma função exponencial decrescente com a profundidade, uma abordagem amplamente utilizada em estudos geotérmicos regionais para reduzir os efeitos de variações laterais do fluxo de calor. Foi utilizado o valor de $A_0 = 1.3\ \mu\mathrm{W\,m^{-3}}$ como produção radiogênica superficial, conforme proposto por CARDOSO (2007) em sua análise da evolução termo-tectônica da plataforma continental do estado do Rio de Janeiro. Essa parametrização é consistente com valores típicos da crosta continental superior e é adequada para a escala regional considerada neste estudo.

4.8 Distribuição da Temperatura Crustal

Os modelos térmicos empregados na avaliação da distribuição de temperatura na crosta terrestre têm como base a equação diferencial do calor, derivada da lei da conservação de energia aplicada ao balanço energético em um meio contínuo. Em aplicações geofísicas e geotérmicas, esses modelos são frequentemente formulados em uma dimensão, assumindo que o campo de temperaturas varia predominantemente na direção vertical, isto é, em função da profundidade. Tal aproximação é amplamente adotada em estudos de bacias sedimentares, onde os gradientes térmicos laterais são geralmente secundários quando comparados às variações verticais.

Entre os diversos modelos propostos para descrever o campo térmico da crosta terrestre, destacam-se aqueles apresentados por HAMZA (1982); HAMZA e MUÑOZ (1996); LACHENBRUCH (1970). No modelo clássico de Lachenbruch, assume-se que a condutividade térmica (λ) é constante, enquanto a produção de calor radiogênico decresce exponencialmente com a profundidade, de acordo com a relação

$$A(z) = A_0 e^{-z/D} \tag{4.9}$$

onde A_0 representa a produção de calor radiogênico na superfície e D é a profundidade característica de decaimento radioativo na crosta. Sob essas hipóteses, a distribuição de temperatura é dada por

$$T(z) = T_0 + \frac{q_0}{\lambda} z + \frac{A_0 D^2}{\lambda} \left(1 - e^{-z/D}\right) \tag{4.10}$$

Essa formulação expressa de forma clara a contribuição combinada do fluxo de calor basal e da produção radiogênica crustal, sendo particularmente adequada para descrever a curvatura do perfil térmico associada à concentração de elementos radioativos na crosta superior. Conforme discutido por STOBER e BUCHER (2021a), esse tipo de abordagem condutiva constitui a base teórica da maioria dos modelos

térmicos aplicados à crosta continental, especialmente em regiões tectonicamente estáveis ou em bacias sedimentares maduras.

Os modelos apresentados em trabalhos clássicos, como os de CHAPMAN (1986), estendem essa abordagem ao permitir a consideração simultânea da variação da condutividade térmica com a profundidade (e, indiretamente, com a temperatura):

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_0}{1 + \alpha T} \tag{4.11}$$

e da distribuição não uniforme da produção de calor radiogênico:

$$A(z) = A_0 e^{-\frac{z}{D}} \tag{4.12}$$

A solução analítica do modelo pode ser expressa por

$$T\left(z\right) = \frac{1}{\alpha}\left\{\left(1 + \alpha.T_0\right) * \left(e^{\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda_m}\right)\left(q_0.z - A_0.D.z + A_0.D^2.\left(1 - e^{-\frac{z}{D}}\right)\right)\right]} - 1\right)\right\} \tag{4.13}$$

em que α representa o fator de variação da condutividade térmica com a temperatura em profundidade; A_0 é a taxa de produção de calor radiogênico na superfície; D corresponde à profundidade característica de decréscimo exponencial da produção radiogênica; q_0 é o fluxo de calor superficial; λ_m a condutividade térmica média do meio; e T_0 a temperatura na superfície.

O decréscimo da produção de calor radiogênico com a profundidade reflete a diferenciação composicional da crosta, uma vez que os elementos radioativos se concentram preferencialmente na crosta superior. Embora a taxa de decréscimo exponencial seja relativamente baixa, sua inclusão no modelo permite refinar significativamente as estimativas de temperatura, sobretudo quando associada à variação da condutividade térmica com a profundidade. STOBER e BUCHER (2021a) ressaltam que essas variações, ainda que sutis, exercem uma influência relevante sobre o campo térmico crustal e não devem ser negligenciadas em análises geotérmicas mais detalhadas.

O potencial geotérmico em diferentes níveis crustais pode ser obtido a partir das isotermas traçadas a partir da variação da Equação (4.13) em diferentes profundidades. Esse procedimento é particularmente útil para a identificação de intervalos favoráveis à exploração geotérmica, como aqueles associados a temperaturas na ordem de 150 °C (MUFFLER e CATALDI, 1978), bem como para a análise da viabilidade de produção de energia geotérmica, atualmente considerada possível em profundidades de até aproximadamente 3 km, com temperaturas superiores a 300 °C em contextos favoráveis.

No contexto da Bacia de Campos, o potencial geotérmico calculado mostra-se

especialmente adequada por incorporar simultaneamente os efeitos da produção radiogênica e da variação da condutividade térmica. Tal abordagem é particularmente relevante diante da complexidade geológica da região, caracterizada por uma espessa coluna sedimentar, heterogeneidade litológica e pela presença dos reservatórios do pré-sal (LIMA *et al.*, 2020). Modelos térmicos mais simplificados tenderiam a subestimar ou superestimar as temperaturas em profundidade, não sendo capazes de representar adequadamente as variações térmicas associadas às diferentes litologias, a possíveis processos hidrotermais profundos e à influência magmática ao longo da margem rifteada (LIMA *et al.*, 2020; VIEIRA e HAMZA, 2018).

Capítulo 5

Resultados e Discussão da Distribuição Geotérmica Crustal da Bacia de Campos

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados da análise geotérmica obtidos para a Bacia de Campos, abrangendo a distribuição do gradiente geotérmico, da condutividade térmica, do fluxo de calor e das variações das isotermas em profundidade estimadas. A integração desses parâmetros permite avaliar o regime térmico da bacia e suas implicações para os recursos energéticos, em especial no contexto da exploração de hidrocarbonetos e do potencial geotérmico (CARDOSO e HAMZA, 2014; DESCOVI, 2024).

Foram gerados mapas temáticos de gradiente geotérmico e de fluxo de calor, além da definição de um novo valor médio de condutividade térmica representativa da Bacia de Campos, o que permitiu o refinamento das estimativas de fluxo de calor em relação a estudos anteriores. Adicionalmente, a ampliação do conjunto de dados empregado neste trabalho permitiu uma avaliação mais abrangente das análises e contribuiu para o aprimoramento dos resultados apresentados ao longo deste capítulo.

5.1 Gradiente Geotérmico

A Figura 5.1 apresenta a relação entre as temperaturas de fundo de poço medidas (BHT) e as temperaturas corrigidas (BHT-$AAPG$). Observa-se um aumento sistemático dos valores após a correção, refletindo-se em temperaturas corrigidas ligeiramente superiores às medidas. A temperatura máxima registrada nos dados medidos foi de 171.1 °C, enquanto a temperatura máxima corrigida atingiu 182.8 °C.

Nota-se que a relação linear entre profundidade e temperatura corrigida (BHT-

$AAPG$) apresenta melhor ajuste quando comparada àquela obtida a partir das temperaturas não corrigidas, indicando maior consistência dos dados após a correção.

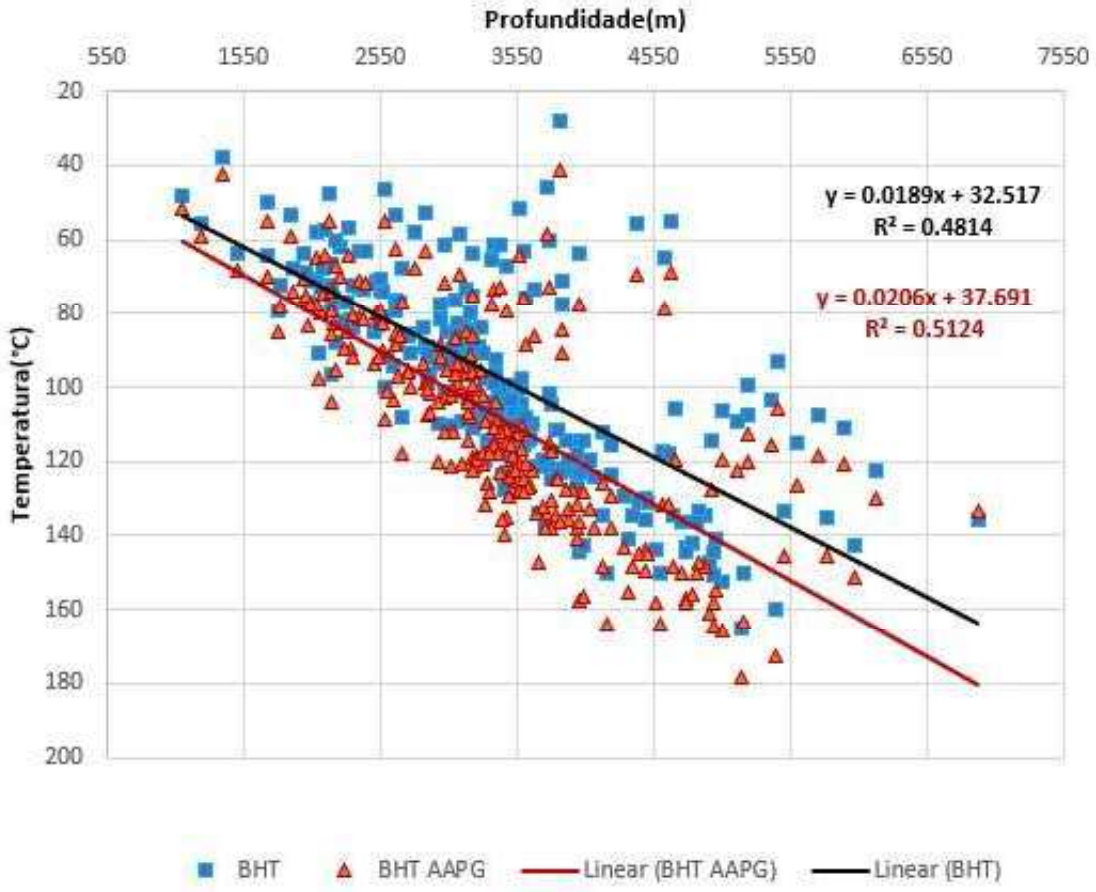


Figura 5.1: Relação entre as temperaturas de fundo de poço medidas (BHT) e corrigidas (BHT-$AAPG$).

O gradiente geotérmico da Bacia de Campos foi calculado a partir das temperaturas de fundo de poço corrigidas (BHT) e das respectivas profundidades. A aplicação da correção reduziu valores anormalmente elevados, permitindo uma estimativa mais representativa do campo térmico regional, como ilustrado na Figura 5.1. A distribuição espacial dos gradientes obtidos é apresentada na Figura 5.4, evidenciando variações significativas ao longo da bacia, com valores mais elevados concentrando-se nas porções mais profundas e no setor norte da área de estudo.

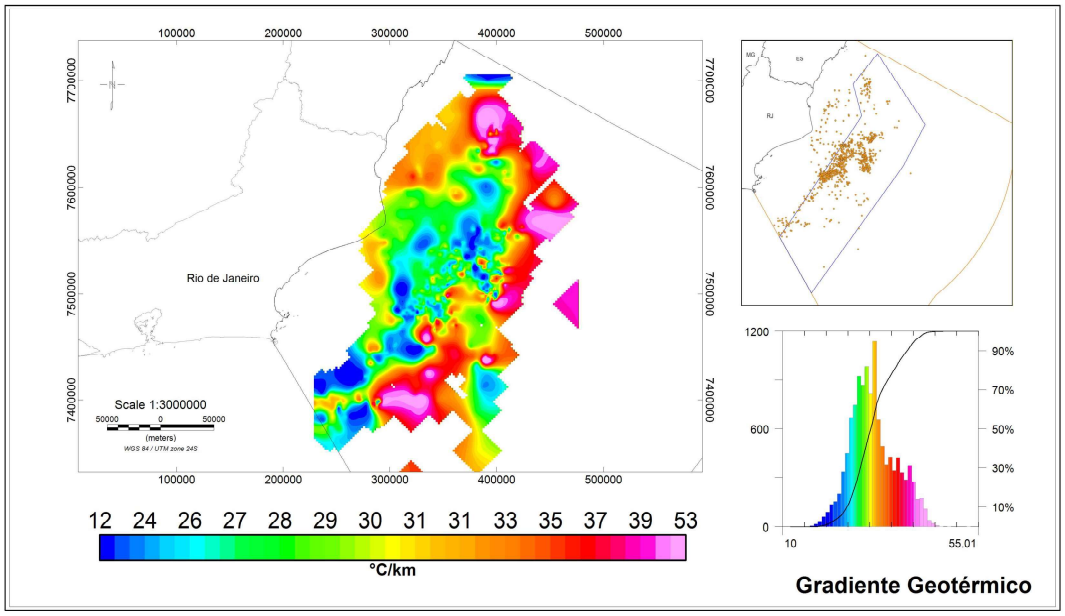


Figura 5.2: Mapa do gradiente geotérmico da Bacia de Campos, obtido a partir de dados de BHT corrigidos e interpolação espacial dos valores de gradiente térmico utilizando o método de mínima curvatura.

A distribuição espacial do gradiente geotérmico evidencia a presença de faixas com valores elevados, particularmente em áreas mais profundas da bacia, situadas em direção à borda externa do polígono do pré-sal, bem como na porção norte da Bacia de Campos, próxima à margem continental em direção ao estado do Espírito Santo. Nessas regiões, os gradientes geotérmicos frequentemente superam 35 °C/km, configurando cinturões térmicos anômalos em relação às áreas adjacentes.

De modo geral, os valores obtidos permanecem compatíveis com aqueles esperados para bacias sedimentares de margem passiva. As regiões mais rasas e próximas ao continente, especialmente no setor sul da bacia, apresentam gradientes geotérmicos mais baixos, com aumento progressivo em direção ao norte. Ressalta-se a existência de lacunas de dados em determinadas áreas, como ao sul do estado do Rio de Janeiro, o que limita a resolução espacial das interpretações locais.

Os gradientes geotérmicos calculados apresentam um valor médio de $\Gamma = 27.3 \pm 5.6$ °C/km, com máximos de $\Gamma_{\max} = 54.7$ °C/km em pontos específicos, conforme resumido na Figura 5.3.

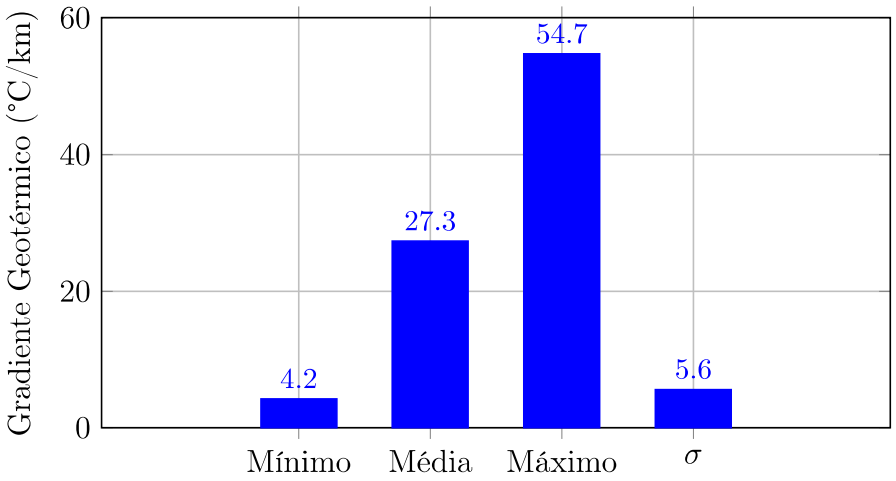


Figura 5.3: Valores mínimo, médio, máximo e desvio padrão do gradiente geotérmico na bacia de Campos.

5.2 Condutividade Térmica

A incorporação de novos dados geotérmicos permitiu o aprimoramento da caracterização térmica da Bacia de Campos, com maior detalhamento espacial de áreas associadas a anomalias térmicas. Nesse contexto, a condutividade térmica média (λ_{med}) calculada para bacia, constitui um parâmetro fundamental para a estimativa do fluxo de calor, uma vez que se relaciona diretamente ao gradiente geotérmico (Γ) por meio da lei de Fourier.

Foram calculados valores de λ_{med} para um total de 450 pontos, a partir dos perfis litológicos disponíveis. Os valores estatísticos da condutividade térmica média ponderada dos poços analisados estão resumidos na Tabela 5.1. Os resultados indicam valores de λ_{med} variando entre 1.94 e 2.79 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$, com valor médio de 2.23 ± 0.18 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$.

Tabela 5.1: Resumo estatístico dos valores de condutividade térmica média ponderada ($\bar{\lambda}_{pond}$) obtidos a partir da integração das espessuras e condutividades térmicas dos litotipos identificados nos perfis litológicos dos poços da Bacia de Campos.

Parâmetro estatístico	$\mathbf{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Valor mínimo	1.94
Valor máximo	2.79
Média	2.23
Desvio padrão	0.18
Número de poços analisados	450

Os valores de λ_{med} obtidos neste trabalho são compatíveis com aqueles reportados para bacias sedimentares de margem passiva. Compilações apresentadas por

MACGREGOR (2020) indicam valores típicos de condutividade térmica variando entre 1.71 e 2.50 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ para esse tipo de ambiente tectônico. Assim, o valor médio de $\lambda_{med} = 2.23$ W,$\mathrm{m^{-1}}$,$\mathrm{K^{-1}}$, recalculado neste trabalho a partir de 450 poços distribuídos na Bacia de Campos, está em concordância com os valores reportados para diferentes bacias de margens passivas, como as bacias sedimentares de Angola.

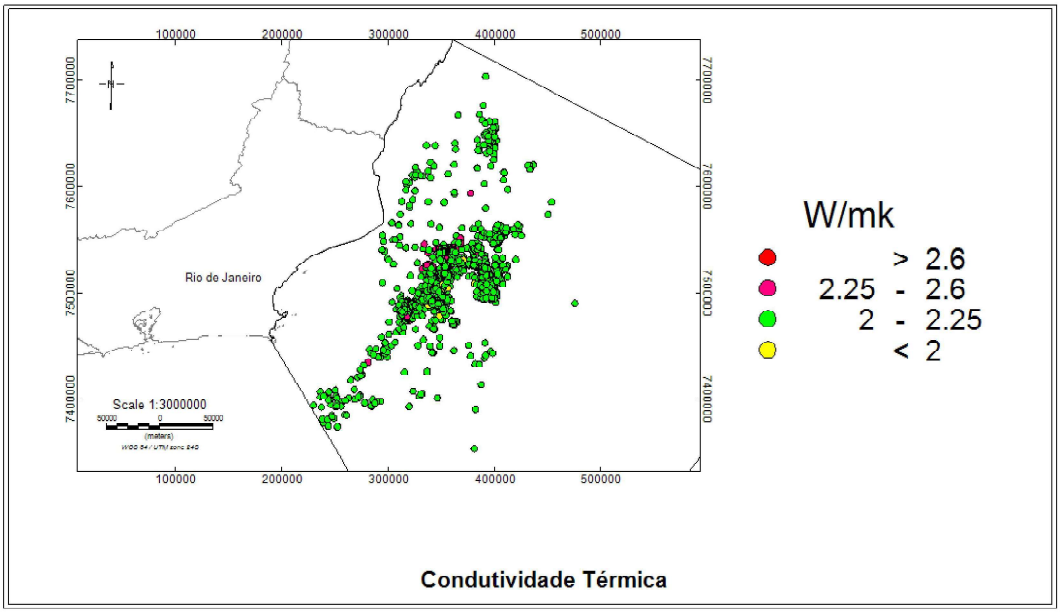


Figura 5.4: Mapa de distribuição pontual da condutividade térmica na Bacia de Campos. Os símbolos circulares indicam os locais de amostragem, com cores variando de acordo com a magnitude do parâmetro em $W/(m \cdot K)$.

A Tabela 5.2 apresenta um exemplo representativo do valor de λ_{med} estimado para um poço individual, evidenciando a contribuição relativa dos diferentes litotipos ao longo da coluna sedimentar.

Tabela 5.2: Cálculo da condutividade térmica média ponderada ($\bar{\lambda}_{pond}$) para o poço 1-RJS-0003B-RJ.

Litotipo	**Espessura (m)**	$\mathbf{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$
Calcilutito	8.0	2.7
Calcarenito	25.0	2.7
Calcirrudito	37.5	2.7
Areia	450.0	2.2
Arenito	281.0	2.5
Argila	3.5	2.2
Argilito	1.0	1.8
Folhelho	167.0	1.9

5.3 Fluxo de Calor

Os mapas atualizados de fluxo de calor da Bacia de Campos foram obtidos a partir da combinação do gradiente geotérmico corrigido e do valor médio de condutividade térmica calculados neste estudo. A adoção da condutividade térmica média ponderada, igual a 2.23 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$, resultou em valores de fluxo de calor inferiores aos estimados em etapas preliminares, nas quais era empregado um valor representativo mais elevado para toda a bacia. Esse refinamento impactou diretamente a magnitude do fluxo de calor, sem alterar, entretanto o padrão espacial das anomalias térmicas identificadas.

O mapa apresentado na Figura 5.5 evidencia a distribuição espacial do fluxo de calor na bacia, destacando valores mais elevados na porção norte e a presença de uma anomalia positiva na região sul. Essas feições indicam heterogeneidade térmica significativa, associada a controles estruturais e tectônicos ao longo da bacia.

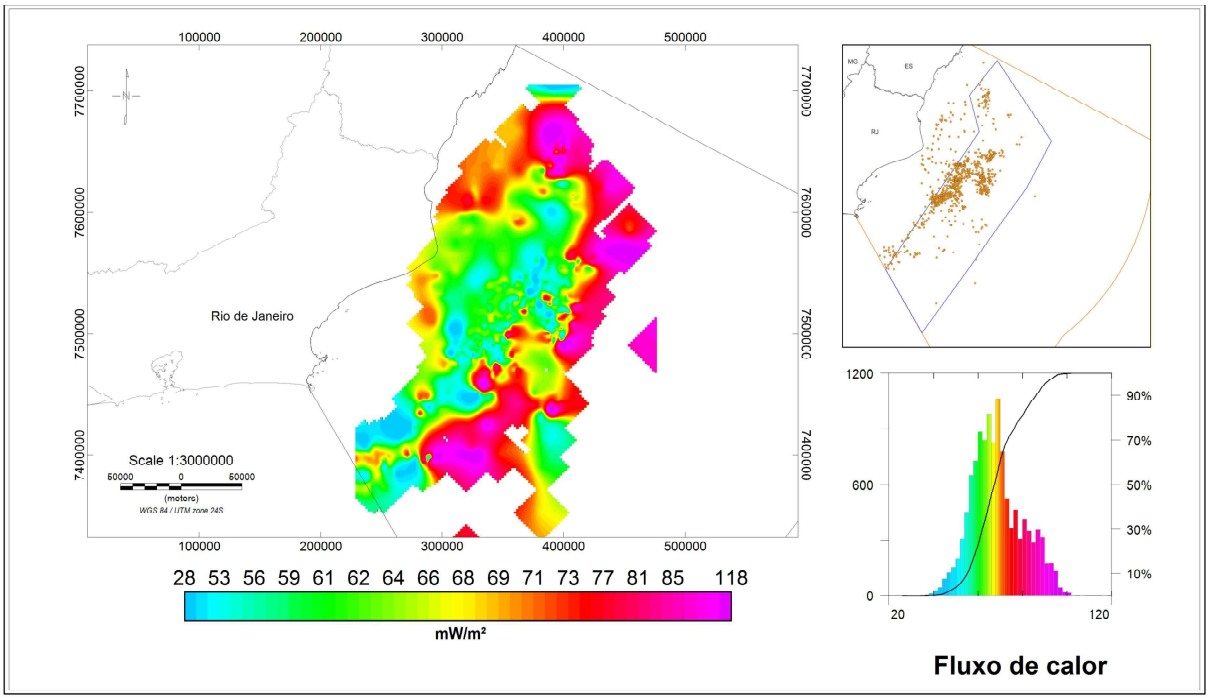


Figura 5.5: Mapa atualizado do fluxo de calor da Bacia de Campos.

O fluxo de calor médio estimado para a Bacia de Campos foi de 61.30 ± 12.53 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$, com valor máximo de 122.06 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$. Esses valores posicionam a bacia no intervalo superior daquele tipicamente reportado para bacias sedimentares desenvolvidas em margens continentais passivas, sugerindo um regime térmico relativamente elevado, coerente com a ocorrência de anomalias térmicas regionais previamente descritas para a margem continental brasileira.

Embora ligeiramente superiores às estimativas globais para margens passivas de idade comparável, os valores médios obtidos permanecem consistentes com aque-

les reportados para outras margens passivas em diferentes contextos geodinâmicos ao redor do mundo. A Tabela 5.3 apresenta uma comparação entre os valores de fluxo de calor estimados neste estudo e aqueles disponíveis na literatura, incluindo determinações previamente publicadas especificamente para a Bacia de Campos.

Tabela 5.3: Fluxo de calor terrestre em margens passivas.

Local	**Fluxo de calor (mW/m^2)**	**Referências**
Margem Angola–Congo	62.0	MACGREGOR (2020)
Norte do Mar do Sul da China	71.8	LI *et al.* (2019)
Irlanda	50.0–55.0	LOUDEN *et al.* (1991)
Costa Leste dos Estados Unidos	49.0	RUPPEL *et al.* (1995)
Bacia de Santos	61.9	DESCOVI (2024)
Bacia de Campos	53.5–66.2	CARDOSO e HAMZA (2014)
Bacia de Campos	61.3	Presente trabalho

5.4 Temperatura Crustal e Recursos Energéticos

A variação da temperatura crustal na Bacia de Campos foi avaliada em diferentes níveis de profundidade com o objetivo de analisar sua evolução térmica e suas implicações para o aproveitamento energético. Os resultados são apresentados para profundidades entre 1 e 5 km, permitindo a caracterização do regime térmico em função do aumento do sepultamento.

Os mapas de temperatura crustal indicam que, a 1 km de profundidade,predominam temperaturas relativamente baixas, com valores médios significativamente inferiores aos limiares técnicos usualmente considerados para aplicações energéticas. A 3 km de profundidade, observa-se um aumento sistemático das temperaturas, embora os valores médios ainda permaneçam abaixo de 150 °C. Em maiores profundidades, particularmente entre 4 e 5 km, os valores máximos tornam-se substancialmente mais elevados, ultrapassando 200 °C em áreas localizadas ao norte e no centro-sul da bacia, enquanto as temperaturas médias continuam refletindo um regime térmico moderado em escala regional.

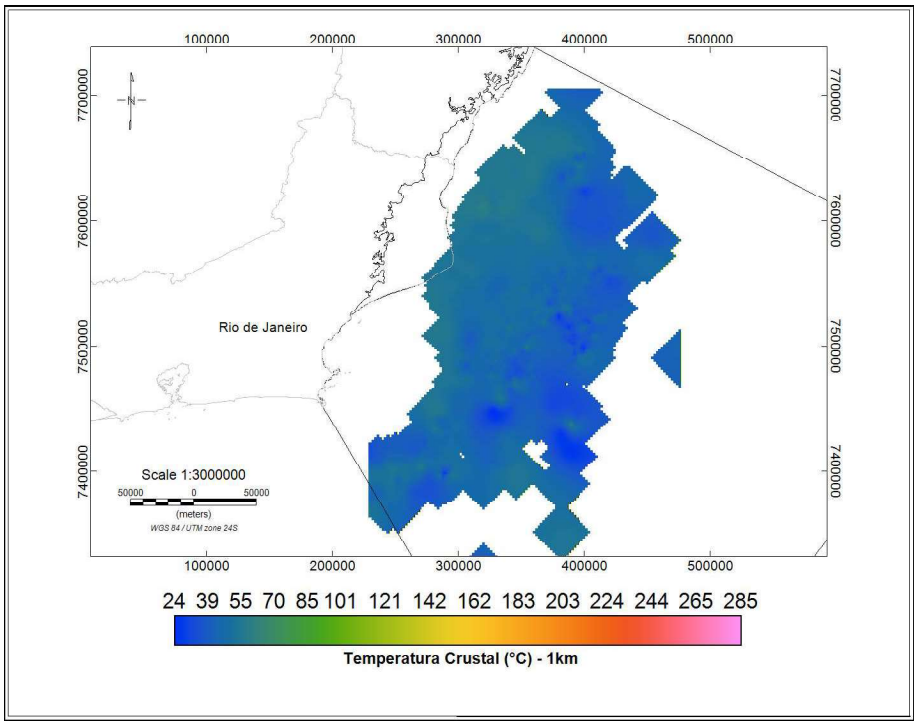


Figura 5.6: Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 1 km de profundidade.

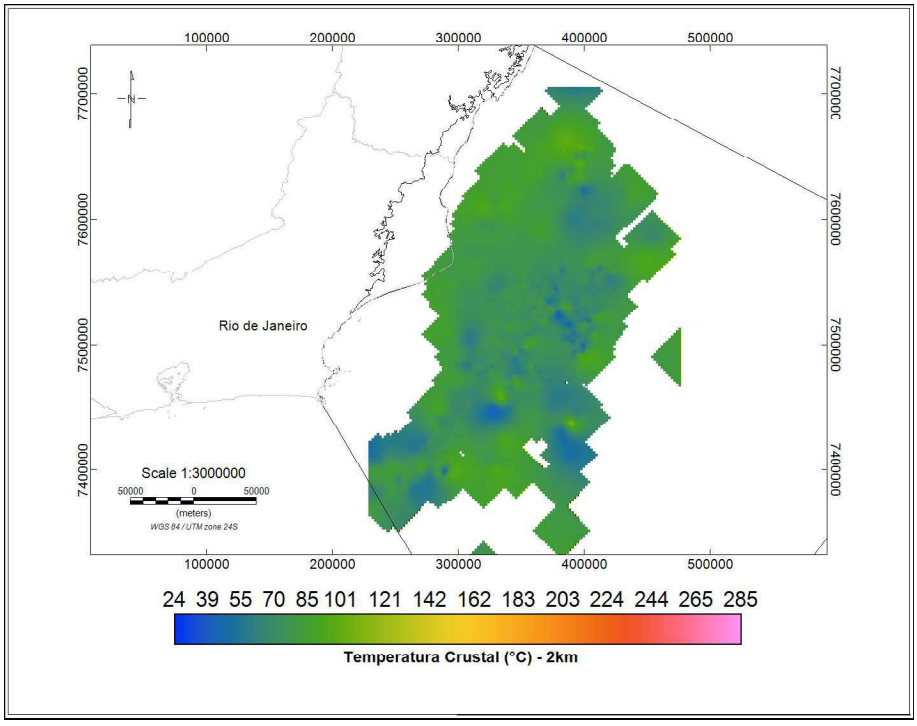


Figura 5.7: Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 2 km de profundidade.

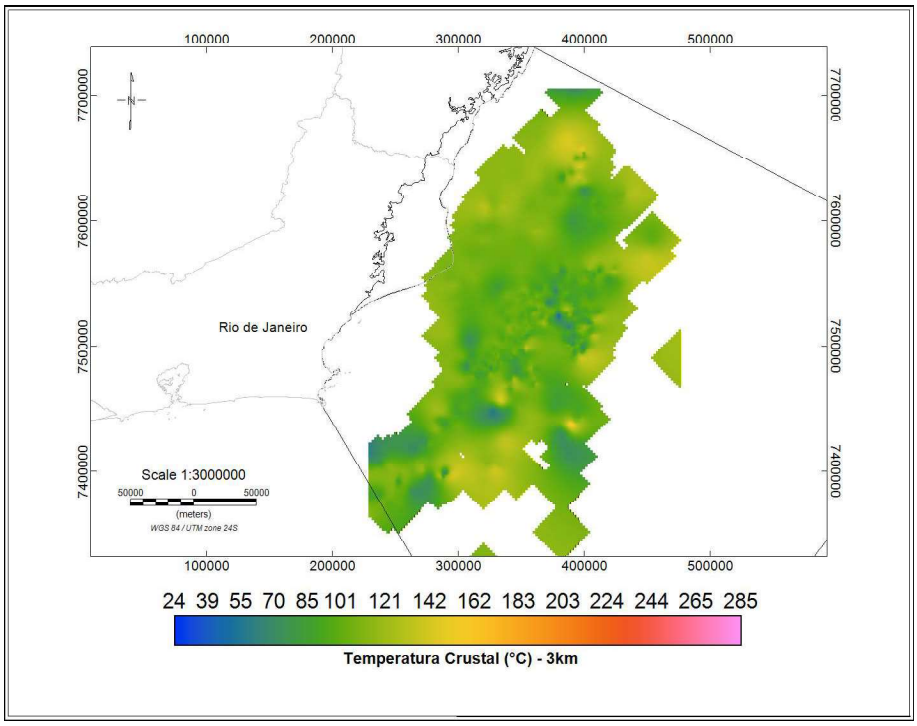


Figura 5.8: Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 3 km de profundidade.

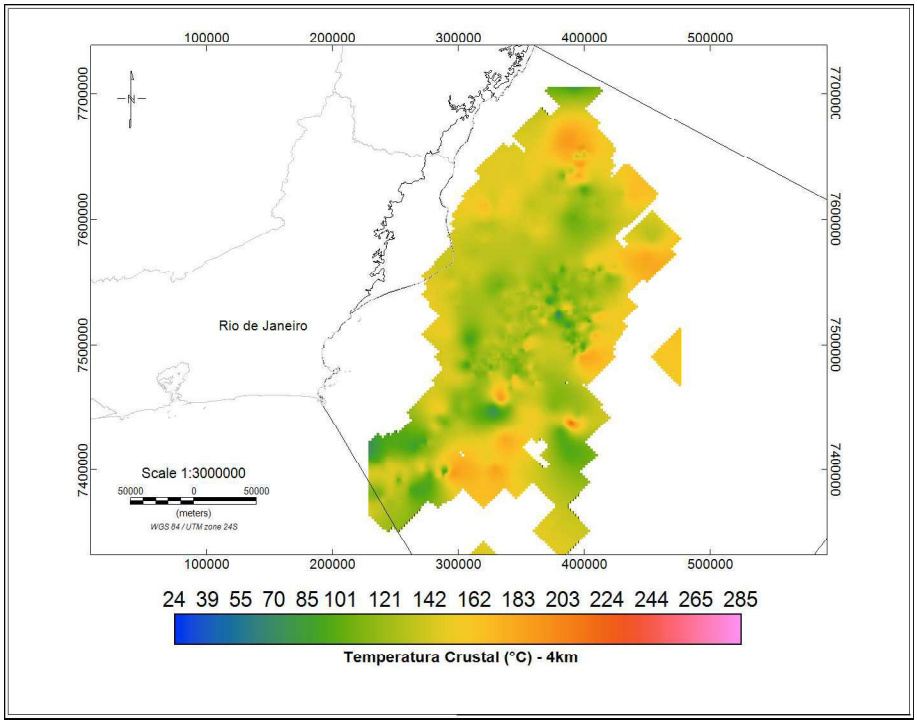


Figura 5.9: Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 4 km de profundidade.

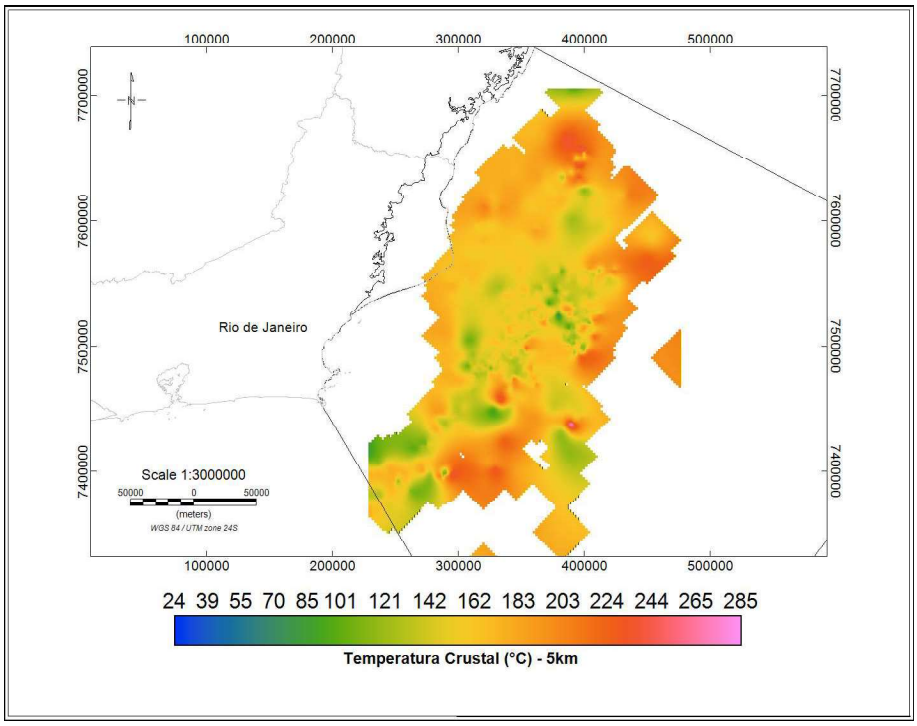


Figura 5.10: Mapa da distribuição da temperatura crustal estimada a 5 km de profundidade.

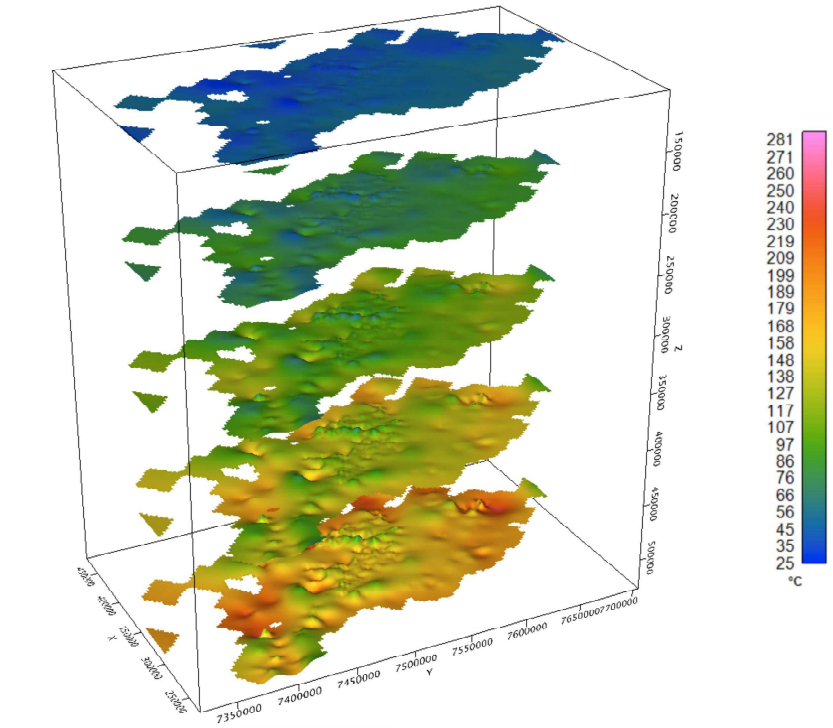


Figura 5.11: Representação tridimensional das cinco isotermas de temperatura analisadas, correspondentes a diferentes níveis de profundidade, destacando a distribuição espacial do campo térmico.

A Figura 5.12 sintetiza a variação das temperaturas mínima, média e máxima em função da profundidade, juntamente com o limiar de 150 °C, frequentemente

adotado como referência técnica para sistemas geotérmicos de média a alta entalpia (MUFFLER e CATALDI, 1978). Observa-se que, embora os valores máximos ultrapassem esse limiar em profundidades superiores a 3 km, as temperaturas médias permanecem abaixo de 150 °C, indicando que condições termicamente favoráveis ocorrem de forma restrita e localizada. Dessa forma, profundidades maiores que 3 km seriam as mais adequadas para a exploração de geoenergia.

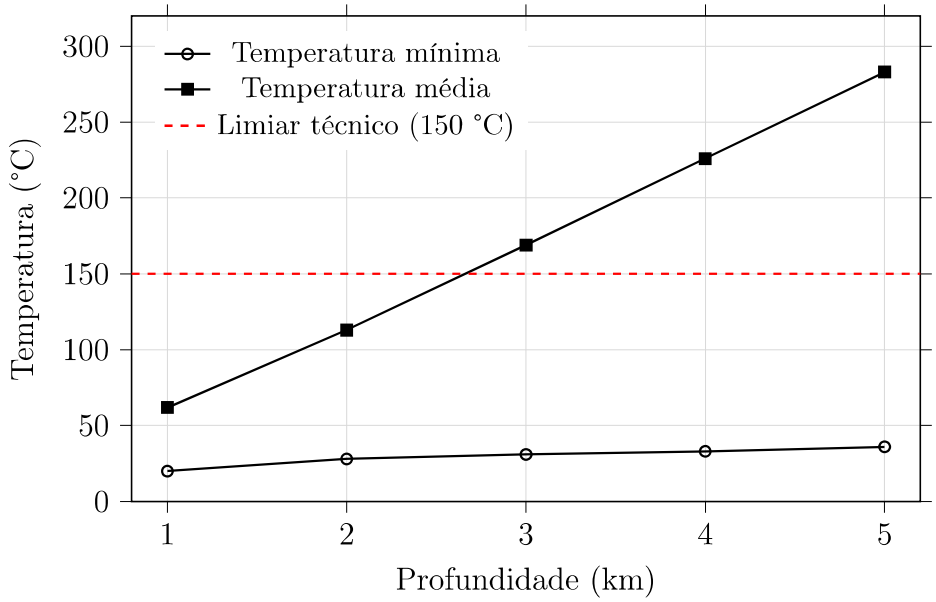


Figura 5.12: Variação das temperaturas mínima e média em função da profundidade na Bacia de Campos. A linha tracejada indica o limiar técnico de 150 °C, comumente adotado como referência para sistemas geotérmicos de alta entalpia.

Tabela 5.4: Síntese das estimativas de temperatura crustal em diferentes profundidades e suas implicações térmicas para a Bacia de Campos.

Profundidade (km)	**Temperatura mínima (°C)**	**Temperatura média (°C)**	**Interpretação térmica (contexto offshore)**
1	20	62	Regime térmico raso, sem implicações energéticas ou geotérmicas relevantes.
2	28	113	Aquecimento progressivo, compatível com o início da maturação térmica da matéria orgânica.
3	31	169	Regime térmico intermediário, favorável à maturação de rochas geradoras e propício à exploração geoenergética.
4	33	226	Regime térmico elevado, associado a condições de alta maturação térmica.
5	36	283	Regime térmico muito elevado, possivelmente relacionado a anomalias térmicas crustais profundas.

De forma geral, os resultados indicam que a ocorrência contínua de temperaturas médias superiores a 150 °C na Bacia de Campos depende do acesso a maiores profundidades, em consonância com o comportamento térmico típico de margens continentais passivas. Estudos clássicos sobre sistemas geotérmicos mostram que temperaturas adequadas à geração eficiente de energia elétrica são, em geral, alcançadas a profundidades superiores a 3–4 km, em função do gradiente geotérmico e das propriedades térmicas dos materiais crustais (DIPIPPO, 2012).

Embora as temperaturas estimadas nos níveis mais profundos atinjam valores típicos de sistemas geotérmicos de alta entalpia, o contexto offshore da bacia de Campos inviabiliza sua interpretação em termos de aproveitamento energético direto. Assim, os resultados devem ser interpretados principalmente em relação ao regime térmico crustal e suas implicações para a evolução térmica da bacia, especialmente em relação a maturação das rochas geradoras, da história térmica regional e da distribuição das anomalias térmicas associadas à margem continental brasileira.

5.4.1 Maturação térmica da matéria orgânica e implicações para o potencial geotérmico

O regime térmico exerce controle direto sobre a maturação da matéria orgânica e, consequentemente, sobre o tipo e a distribuição dos hidrocarbonetos gerados em bacias sedimentares. Os resultados obtidos a partir da análise dos poços selecionados na bacia de Campos evidenciam variações expressivas nos gradientes geotérmicos, nos valores de fluxo de calor e nas temperaturas crustais associadas às janelas de maturação térmica, refletindo a heterogeneidade térmica da bacia.

A maturação térmica da matéria orgânica foi interpretada com base no modelo clássico proposto por TISSOT e WELTE (1984), no qual a evolução térmica é descrita em função da temperatura. Nesse contexto, distinguem-se as fases imatura (diagênese), madura (catagênese) e senil (metagênese), conforme resumido na Tabela 5.5. Essa classificação constitui a base para a análise das janelas de geração de óleo e gás nos poços estudados.

Tabela 5.5: Fases de maturação térmica da matéria orgânica e intervalos de temperatura, segundo TISSOT e WELTE (1984).

Fase de maturação	Estágio	Temperatura (°C)
Imatura	Diagênese	< 60
Maturo	Catagênese	60–150
Senil	Metagênese	> 150

Com o objetivo de integrar a análise da maturação térmica ao potencial geotérmico, adotou-se a classificação dos recursos geotermais em função da entalpia, proposta por MUFFLER e CATALDI (1978), na qual a temperatura é utilizada como proxy da entalpia específica. Essa abordagem permite distinguir recursos de baixa, média e alta entalpia, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Classificação dos recursos geotermais em função da entalpia, expressa por intervalos de temperatura, segundo MUFFLER e CATALDI (1978).

Classe de entalpia	Temperatura (°C)
Baixa entalpia	< 90
Média entalpia	90–150
Alta entalpia	> 150

Para esta análise, foram selecionados quatro poços distribuídos em diferentes setores da Bacia de Campos (porções norte, sul, leste e oeste), conforme ilustrado na Figura 5.13, com o objetivo de avaliar a variação da temperatura em profundidade em relação às classificações de maturação térmica da matéria orgânica e de entalpia

dos recursos geotérmicos. A escolha considerou os gradientes geotérmicos estimados, incluindo dois poços com valores elevados e dois com valores reduzidos, de modo a representar diferentes condições térmicas da área de estudo.

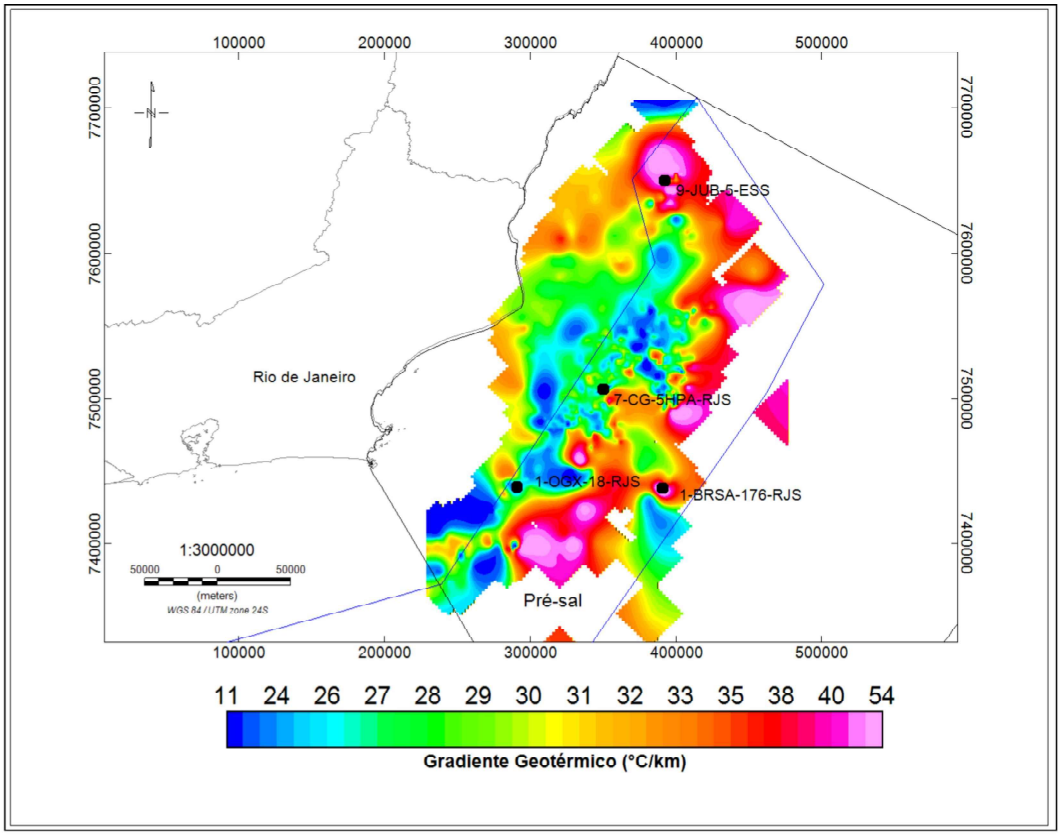


Figura 5.13: Localização dos quatro poços analisados na Bacia de Campos, destacando sua distribuição espacial nas porções norte, sul, leste e oeste, bem como a classificação relativa dos gradientes geotérmicos (altos e baixos).

Os perfis térmicos e os campos de entalpia correspondentes são apresentados na Figura 5.14. Os resultados evidenciam contrastes marcantes entre os poços, associados tanto à magnitude dos gradientes geotérmicos quanto às profundidades em que se estabelecem os distintos regimes de entalpia, com reflexos diretos na evolução térmica da matéria orgânica e no potencial de aproveitamento geotérmico.

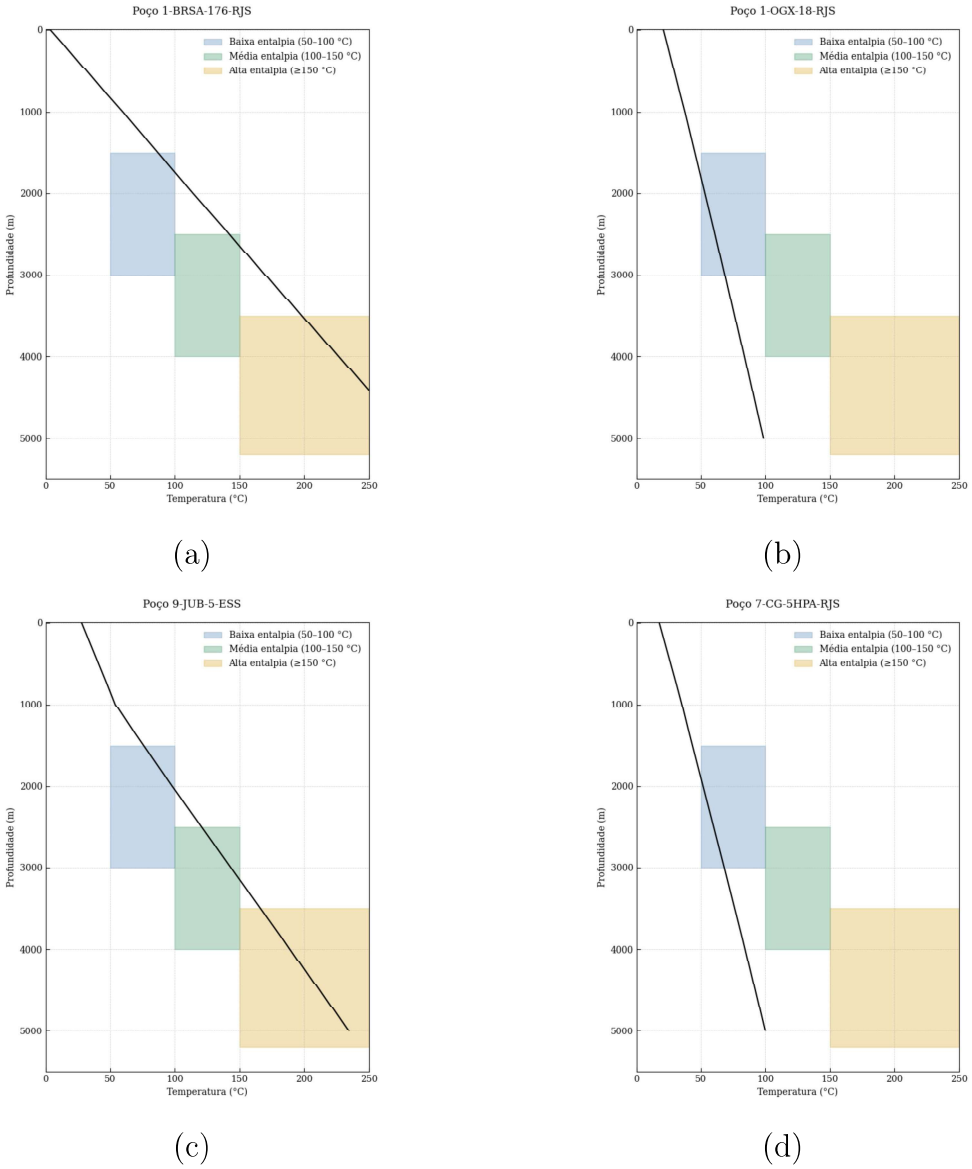


Figura 5.14: Perfis térmicos e campos de entalpia para os quatro poços analisados.

Nos poços 1-OGX-18-RJS e 7-CG-5HPA-RJS, caracterizados por gradientes geotérmicos mais baixos, as temperaturas correspondentes à janela de geração de óleo são atingidas apenas em maiores profundidades, restringindo-se predominantemente a regimes de baixa entalpia. Em contraste, os poços 1-BRSA-176-RJS e 9-JUB-5-ESS, que apresentam gradientes geotérmicos mais elevados, exibem um aumento mais rápido da temperatura com a profundidade, favorecendo o estabelecimento de regimes de média e alta entalpia em níveis crustais mais rasos.

As janelas de maturação térmica da matéria orgânica associadas aos quatro poços analisados são apresentadas na Figura 5.15. Observa-se que os poços de maior gradiente geotérmico (1-BRSA-176-RJS e 9-JUB-5-ESS) apresentam uma antecipação da janela de geração de óleo e uma progressão mais rápida para estágios avançados de maturação. Por outro lado, nos poços de menor gradiente, a maturação térmica

permanece limitada a intervalos mais profundos, não atingindo os estágios posteriores à catagênese oleosa, em concordância com a classificação proposta por TISSOT e WELTE (1984).

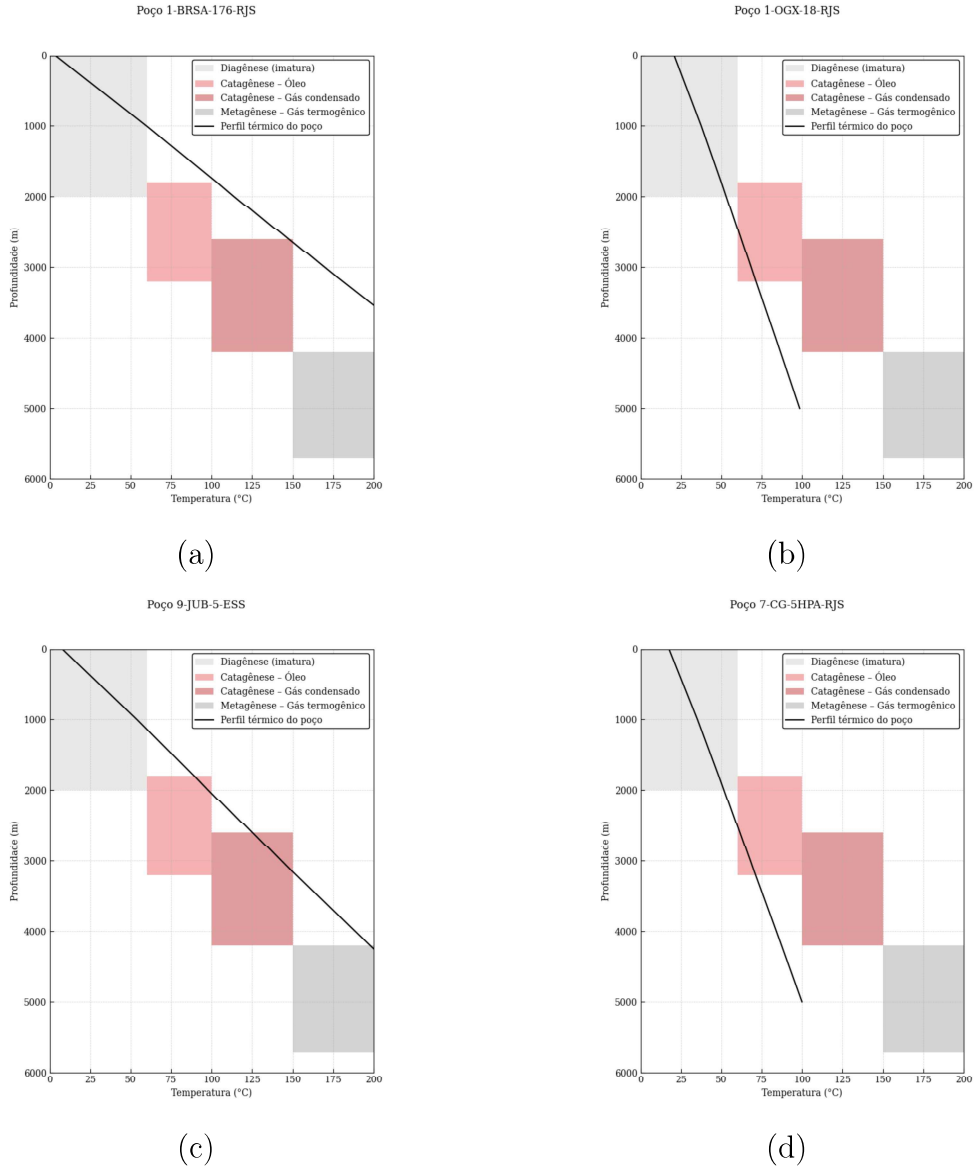


Figura 5.15: Janelas de maturação térmica da matéria orgânica para os quatro poços analisados, segundo a classificação de TISSOT e WELTE (1984).

Embora a análise tenha sido realizada a partir de um conjunto restrito de quatro poços da Bacia de Campos, os resultados obtidos reforçam tendências já descritas na literatura. Estudos anteriores, como o de DESCOVI (2024), apontam que poços associados a gradientes geotérmicos mais elevados e ao atingimento de temperaturas significativas em menores profundidades concentram maior conteúdo energético disponível.

Dessa forma, os mesmos fatores térmicos que controlam a maturação da matéria orgânica e a geração de hidrocarbonetos também se mostram determinantes

para a avaliação do potencial geotérmico, constituindo critérios técnicos relevantes para a seleção de poços com maior viabilidade para estratégias de reaproveitamento energético, como o retrofitting geotérmico e a coprodução de energia.

5.4.2 Retrofitting

A energia geotérmica é reconhecida como uma fonte energética confiável, sustentável e abundante, com impacto ambiental relativamente reduzido. Seu aproveitamento pode ocorrer de forma direta, por meio de manifestações naturais, como fontes termais, ou de forma indireta, para a geração de eletricidade. Um dos principais desafios associados à exploração desse recurso está no acesso às zonas aquecidas em profundidade, o que geralmente requer a perfuração de poços, implicando elevados custos operacionais. Nesse contexto, a reutilização de poços de petróleo e gás abandonados ou inativos surge como uma alternativa tecnicamente atrativa, uma vez que esses poços já atingem profundidades compatíveis com a exploração geotérmica ou podem ser adaptados por meio de técnicas modernas de perfuração profunda (MAO *et al.*, 2023; SANYAL *et al.*, 2024).

O abandono de poços de petróleo é uma etapa necessária para garantir a integridade estrutural e ambiental das áreas exploradas, gerando custos significativos para a indústria. A conversão desses poços em sistemas geotérmicos representa, portanto, uma possibilidade de reaproveitamento de infraestrutura existente, com potencial para produção de calor ou eletricidade (MAO *et al.*, 2023). Essa abordagem tem sido discutida tanto para poços onshore quanto offshore, especialmente em bacias maduras sob o ponto de vista exploratório (SANYAL *et al.*, 2024).

Na Bacia de Campos, os resultados obtidos indicam valores médios de fluxo de calor da ordem de 60–70 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$, com ocorrência de setores onde os valores ultrapassam 80 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$. Associados a esses fluxos de calor, os gradientes geotérmicos estimados variam entre 23.5 e 42.1 $\mathrm{^{\circ}C\,km^{-1}}$, com média de aproximadamente 31.4 $\mathrm{^{\circ}C\,km^{-1}}$. Em áreas estruturais elevadas que delimitam a bacia, as temperaturas estimadas atingem valores superiores a 150 °C a profundidades entre 2 e 2.5 km, caracterizando alvos potenciais para aplicações geotérmicas.

Estudos anteriores indicam que *BHTs* superiores a 85 °C aumentam significativamente o potencial para a geração de calor ou eletricidade, reforçando a viabilidade do retrofitting geotérmico (MOUSSA e DEHGHANPOUR, 2022; WEI e GUO, 2022). Poços profundos localizados em regiões com gradiente geotérmico igual ou superior a 40 $\mathrm{^{\circ}C\,km^{-1}}$ e fluxo de calor acima de 60 $\mathrm{mW\,m^{-2}}$ são considerados particularmente favoráveis para esse tipo de aplicação (MOUSSA e DEHGHANPOUR, 2022; SANYAL *et al.*, 2024). Parte dos poços analisados neste estudo atende a esses critérios, sobretudo em setores específicos da bacia.

Entretanto, as maiores temperaturas estimadas, que atingem valores próximos a 170 °C, estão associadas a profundidades superiores a 3 km, o que pode representar limitações operacionais e econômicas, especialmente em ambiente offshore (ZHANG *et al.*, 2020). Nessas condições, de baixa a média entalpia, tecnologias como o Ciclo de Rankine Orgânico (ORC) mostram-se mais adequadas para o aproveitamento energético, sendo compatíveis com temperaturas inferiores a 180 °C (WIELAND *et al.*, 2023).

Outra possibilidade discutida na literatura é a coprodução geotérmica associada à exploração de hidrocarbonetos, na qual o calor da água produzida, juntamente com óleo e gás, é aproveitado para a geração de energia térmica ou elétrica (KOVACS *et al.*, 2022; SOUZA e SZKLO, 2025). No entanto, a aplicação dessa abordagem em ambiente offshore demanda modificações significativas na infraestrutura existente, incluindo adaptações em plataformas e sistemas de transporte, além de enfrentar desafios relacionados a altas pressões, ambientes corrosivos e à necessidade de equipamentos especializados (PEDAMALLU e OZGENER, 2019).

Apesar dessas limitações, a maturidade exploratória da Bacia de Campos, aliada à intensificação das atividades no pré-sal e à redução das taxas de sucesso exploratório nas últimas décadas, sugere um cenário favorável à desativação progressiva de campos maduros. Esse contexto reforça a relevância do retrofitting geotérmico como uma alternativa para a diversificação do uso energético da bacia. Assim, os resultados apresentados neste estudo indicam que, embora o potencial geotérmico regional seja heterogêneo, setores específicos da Bacia de Campos apresentam condições térmicas compatíveis com o reaproveitamento geotérmico de poços existentes, desde que haja uma seleção criteriosa dos alvos e uma avaliação integrada dos aspectos técnicos, econômicos e operacionais.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo principal a reavaliação do regime térmico da bacia de Campos, por meio da integração de dados corrigidos de temperatura de fundo de poço, gradiente geotérmico, condutividade térmica e fluxo de calor, com vistas a aprimorar a compreensão do comportamento térmico regional e de suas implicações para a avaliação de recursos energéticos. A abordagem metodológica adotada fundamentou-se em procedimentos amplamente consolidados na literatura especializada, bem como na ampliação e sistematização do conjunto de dados disponíveis, possibilitando o refinamento das estimativas térmicas previamente propostas para a bacia.

Os resultados obtidos indicam que a Bacia de Campos exibe um regime térmico compatível com o de bacias sedimentares desenvolvidas em margens passivas, caracterizado por valores médios de gradiente geotérmico de 27.3 ± 5.6 °C/km e fluxo de calor médio de aproximadamente 61.30 ± 12.53 mW m^{-2}. A distribuição espacial desses parâmetros revela uma heterogeneidade térmica significativa, com anomalias positivas concentradas, sobretudo, no setor norte da bacia e em maiores profundidades. A coincidência espacial entre gradientes geotérmicos elevados, altos valores de fluxo de calor e temperaturas crustais máximas sugere a influência de controles estruturais e tectônicos sobre o regime térmico regional, não se descartando a contribuição de processos hidrotermais localizados. Interpretações análogas têm sido propostas para outras margens passivas, nas quais a reativação de estruturas profundas e a circulação de fluidos em zonas fraturadas desempenham papel relevante na configuração do campo térmico (CARDOSO e HAMZA, 2014; LIMA *et al.*, 2020).

A estimativa da condutividade térmica média minimizando os efeitos produzidos pela variação lateral deste parâmetro, derivada de perfis litológicos de um conjunto estatisticamente significativo de poços, resultou em um valor representativo de 2.23 ± 0.18 W m^{-1} K^{-1}, em consonância com valores previamente reportados para outras margens passivas. A utilização desse valor médio ponderado contribuiu para o aprimoramento das estimativas de fluxo de calor, mitigando incertezas associadas

ao emprego de parâmetros genéricos e aumentando a robustez e a confiabilidade dos mapas térmicos produzidos neste estudo.

A análise do regime térmico crustal em distintos níveis de profundidade evidenciou que, embora temperaturas máximas superiores a 150 °C sejam localmente atingidas a partir de profundidades da ordem de 3–4 km, os valores médios regionais permanecem abaixo desse limiar tecnológico. Esse padrão térmico indica que o potencial geotérmico da Bacia de Campos, em ambiente offshore, é limitado, não sendo favorável à geração elétrica convencional e ficando condicionado a aplicações pontuais associadas à exploração de reservatórios profundos, dependentes da ocorrência de gradientes geotérmicos elevados e da viabilidade técnica de perfuração em grandes profundidades.

Do ponto de vista da exploração de hidrocarbonetos, os valores de fluxo de calor e de gradiente geotérmico obtidos neste estudo corroboram a relevância do regime térmico no controle da maturação da matéria orgânica e na evolução dos sistemas petrolíferos da bacia. As anomalias térmicas identificadas podem ter desempenhado papel significativo na aceleração dos processos de maturação em setores específicos, influenciando, assim, a distribuição espacial das janelas de geração de óleo e gás.

Como principal contribuição, este trabalho apresenta uma caracterização atualizada e integrada do regime térmico da Bacia de Campos, por meio da elaboração de mapas refinados de gradiente geotérmico, fluxo de calor e temperatura crustal, fundamentados em um conjunto ampliado de dados e em parâmetros térmicos representativos da bacia. Esses resultados constituem uma base consistente para investigações futuras, envolvendo modelagem térmica, avaliação do potencial geotérmico e análise da evolução térmica de sistemas petrolíferos em margens passivas brasileiras.

Por fim, ressalta-se que estudos subsequentes podem ser aprimorados pela incorporação de medições adicionais de condutividade térmica in situ, pela integração com modelos termo– cronológicos e pela avaliação mais detalhada do impacto de eventos magmáticos e de circulação hidrotermal na modulação do campo térmico da Bacia de Campos. Dessa forma, o estudo contribuiu para o avanço do conhecimento térmico da Bacia de Campos e reforçou o potencial da integração de dados geotérmicos como ferramenta de apoio a estudos energéticos e geológicos em margens passivas brasileiras.

Referências Bibliográficas

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

ANP, 2017. "Bacia de Campos: Sumário Geológico e Setores em Oferta". Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/ofertas-permanentes/bacias-sedimentares/bacia-de-campos>. Acesso em: 11 set. 2017.

ANP, 2023. "Relatórios Técnicos e de Produção". Disponível em: https://www.anp.gov.br. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

BEARDSMORE, G. R., CULL, J. P., 2001, *Crustal heat flow: a guide to measurement and modelling.* Cambridge university press.

BEGLINGER, S. E., VAN WEES, J.-D., CLOETINGH, S., DOUST, H., 2012, "Tectonic subsidence history and source-rock maturation in the Campos Basin, Brazil", *Petroleum Geoscience*, v. 18, n. 2, pp. 153–172.

BLACKWELL, D. D., STEELE, J. L., FROHME, M. K., MURPHY, C. F., 1989, "Heat flow and geothermal gradient in the eastern United States", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 94, n. B10, pp. 13519–13550. doi: 10.1029/JB094iB10p13519.

BRUHN, C. H., MORAES, M. A. S., 2001, "Petroleum systems of the Campos Basin", *AAPG Bulletin*, v. 85, n. 7, pp. 1203–1231. doi: 10.1306/8627C6F3-173B-11D7-8645000102C1865D.

CARDOSO, R. A., HAMZA, V., 2014, "Heat Flow in the Campos Sedimentary Basin and Thermal History of the Continental Margin of Southeast Brazil", *ISRN Geophysics*, v. 2014, pp. Article ID 384752, 19 pages. doi: 10.1155/2014/384752. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/384752>.

CARDOSO, R. D. A., 2007, *Evolução termo-tectônica da plataforma continental do estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de mestrado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, RJ.

CHANG, H. K., KAWASAKI, M., ALHEIROS, M. M., 1992, "The Campos and Santos Basins", *AAPG Memoir*, v. 62, pp. 117–141.

CHAPMAN, D., 1986, "Thermal gradients in the continental crust", *Geological Society, London, Special Publications*, v. 24, pp. 63–70.

CHRISTENSEN, N., MOONEY, W., 1995, "Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 100, n. B6, pp. 9761–9788. doi: 10.1029/95JB00259. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/95JB00259>.

CONTRERAS, J., ZÜHLKE, R., BOWMAN, S., BECHSTÄDT, T., 2010, "Seismic stratigraphy and subsidence analysis of the southern Brazilian margin (Campos, Santos and Pelotas basins)", *Marine and Petroleum Geology*, v. 27, n. 8, pp. 1952–1970. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2010.07.008.

CUNHA, T., RASMUSSEN, H., VILLINGER, H., AKINWUMIJU, A. A., 2021, "Burial and Heat Flux Modelling along a Southern Vøring Basin Transect: Implications for the Petroleum Systems and Thermal Regimes in the Deep Mid-Norwegian Sea", *Geosciences*, v. 11, n. 5, pp. 210. doi: 10.3390/geosciences11050210.

DAVIS, E., FISHER, A., 2020, "Heat Flow, Seafloor: Methods and Observations", *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. doi: 10.1007/978-90-481-8702-7_65.

DE CASTRO, R. D., PICOLINI, J. P., 2015, "Principais aspectos da geologia regional da Bacia de Campos". In: *Geologia e Geomorfologia*, Elsevier, pp. 1–12.

DESCOVI, P. L. M., 2024, *Caracterização de reservatórios ígneos na Bacia de Santos através dos métodos geotérmicos, sísmicos e de perfilagem*. Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, RJ.

DIAS, J., SCARTON, J., ESTEVES, F., CARMINATTI, M., GUARDADO, L., 1990, "Aspectos da evolução tectono-sedimentar ea ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos", *Origem e evolução de bacias sedimentares*, v. 2, pp. 333–360.

DIPIPPO, R., 2012, *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact.* Butterworth-Heinemann.

FOLDVIK, A., KVINGE, T., 1974, "Conditional instability of sea water at the freezing point". In: *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 21, pp. 169–174. Elsevier.

GHOLAMREZAIE, E., SCHECK-WENDEROTH, M., SIPPEL, J., STRECKER, M., 2018, "Variability of the geothermal gradient across two differently aged magma-rich continental rifted margins of the Atlantic Ocean: the Southwest African and the Norwegian margins", *Solid Earth*, v. 9, pp. 139–158. doi: 10.5194/se-9-139-2018.

GUARDADO, L. R., GAMBOA, L. A. P., LUCCHESI, C. F., 1989, "Petroleum geology of the Campos Basin, Brazil, a model for a producing Atlantic type basin: Part 1". In: *AAPG Special Volumes*, AAPG.

GUARDADO, L. R., SPADINI, A. R., BRANDÃO, J. S. L., MELLO, M. R., 2000, "Petroleum System of the Campos Basin, Brazil". In: *AAPG Memoir 73*, AAPG Special Volumes, cap. 22.

GUIMARÃES, S. N. P., PRADO, E. M. G., VIEIRA, F. P., LACASSE, C. M., DA SILVA ROCHA, N., DE JESUS, B. L., DE SOUZA FILHO, O. A., 2022, "Updated mapping of terrestrial heat flow in Brazil", *Journal of South American Earth Sciences*, v. 113, pp. 103627.

HAMZA, V. M., 1982, "Heat flow in South America", *Journal of Geophysical Research*, v. 87, n. B8, pp. 6373–6391. doi: 10.1029/JB087iB08p06373.

HAMZA, V. M., CARDOSO, R. R., 2017, "Heat flow variations along the Brazilian continental margin", *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 35, n. 1, pp. 5–20.

HAMZA, V. M., MUÑOZ, M., 1996, "Heat flow map of South America", *Geothermics*, v. 25, n. 6, pp. 599–646. doi: 10.1016/S0375-6505(96)00025-9.

HAMZA, V. M., VIEIRA, F. P., SILVA, R. T., 2018, "Anomalous heat flow belt along the continental margin of Brazil", *International Journal of Earth Sciences*, v. 107, pp. 19–33.

HYNDMAN, R., DAVIS, E., 1982, "A mechanism for the formation of petroleum in oceanic crustal rocks", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 46, pp. 2553–2558.

JESSOP, A. M., 1990, *Thermal Geophysics*, v. 17, *Developments in Solid Earth Geophysics.* Amsterdam, Elsevier.

JONES, A. G., READMAN, P. W., 2018, "Heat flow, crustal structure and geothermal gradient in Ireland", *Geothermics*, v. 74, pp. 29–43. doi: 10.1016/j.geothermics.2018.02.002.

KEHLE, R., SCHOEPPEL, R., DEFORD, R., 1970, "The AAPG geothermal survey of North America", *Geothermics*, v. 2, pp. 358–367. ISSN: 0375-6505. doi: https://doi.org/10.1016/0375-6505(70)90034-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375650570900349>.

KOLAWOLE, F., EVENICK, J. C., 2023, "Global distribution of geothermal gradients in sedimentary basins", *Geoscience Frontiers*, v. 14, n. 4, pp. 101563. doi: 10.1016/j.gsf.2022.101563.

KOVACS, A., LIMBERGER, J., MÖLLER, P., HURTER, S., 2022, "Repurposing oil and gas wells for geothermal energy production", *Geothermics*, v. 101, pp. 102355. doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102355.

LACHENBRUCH, A. H., 1959, "Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska", *U.S. Geological Survey Bulletin*, v. 1083-C, pp. 73–109.

LACHENBRUCH, A., SASS, J., 1977, "Heat flow in the United States and the thermal regime of the crust", *Geological Society of America Bulletin*, v. 88, pp. 293–307.

LACHENBRUCH, A. H., 1970, "Crustal temperature and heat production: Implications of the linear heat-flow relation", *Journal of Geophysical Research*, v. 75, n. 17, pp. 3291–3300.

LASKE, G., MASTERS, G., MA, Z., PASYANOS, M., 2013, "Update on CRUST1.0—A 1-degree global model of Earth's crust", *Geophysical Research Abstracts*, v. 15, pp. EGU2013–2658.

LI, Y., JIANG, Z., JIANG, S., LIU, H., WANG, B., 2019, "Heat flow and thermal evolution of a passive continental margin from shelf to slope–a case study on the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea", *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 171, pp. 88–102. doi: 10.1016/j.jseaes.2018.11.019.

LIMA, B. E. M., TEDESCHI, L. R., PESTILHO, A. L. S., SANTOS, R. V., VAZQUEZ, J. C., GUZZO, J. V. P., DE ROS, L. F., 2020, "Deep-burial hydrothermal alteration of the Pre-Salt carbonate reservoirs from northern

Campos Basin, offshore Brazil: Evidence from petrography, fluid inclusions, Sr, C and O isotopes", *Marine and Petroleum Geology*, v. 113, pp. 104143. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.104143.

LOUDEN, K., SIBUET, J.-C., FOUCHER, J.-P., 1991, "Variations in heat flow across the Goban Spur and Galicia Bank continental margins", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 96, n. B10, pp. 16131–16150. doi: 10.1029/91JB00617.

LUCAZEAU, F., LESQUER, A., VASSEUR, G., 1991, "Trends of heat flow density from West Africa". In: *Terrestrial Heat Flow and the Lithosphere Structure*, Springer, pp. 417–425.

LUND, J. W., BOYD, T. L., 2016, "Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review", *Geothermics*, v. 60, pp. 66–93.

MACGREGOR, D. S., 2020, "Regional variations in geothermal gradient and heat flow across the African plate", *Journal of African Earth Sciences*, v. 171, pp. 103950. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2020.103950.

MADON, M., JONG, J., 2021, "Geothermal gradient and heat flow maps of offshore Malaysia: Some updates and observations." *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, v. 71.

MAO, W., WANG, J., LIU, M., GU, X., SUN, Y., DONG, Y., 2023, "Economic analysis and optimization of geothermal energy recovery from abandoned oil and gas wells", *Renewable Energy*, v. 199, pp. 2234–2245. doi: 10.1016/j.renene.2022.12.053.

MCKENZIE, D., PRIESTLEY, K., HO, T., 2005, "The relationship between the Moho depth and the thermal structure of the lithosphere", *Geophysical Journal International*, v. 162, n. 3, pp. 767–780. doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02629.x.

MEISTER, J., HAMZA, V. M., 1973, "Heat flow and geothermal gradients in the Recôncavo Basin, Brazil", *Geothermics*, v. 2, pp. 44–52. doi: 10.1016/0375-6505(73)90049-9.

MILANI, E. J., THOMAZ FILHO, A., 2000, "Sedimentary basins of south America", *Tectonic Evolution of South America*, v. 31, pp. 389–449.

MILANI, E. J., RANGEL, H. D., BUENO, G. V., STICA, J. M., WINTER, W. R., CAIXETA, J. M., NETO, O. P., 2007, "Bacias sedimentares brasileiras:

cartas estratigráficas", *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, v. 15, n. 2, pp. 183–205.

MIZUSAKI, A., PETRINI, R., BELLIENI, P., COMIN-CHIARAMONTI, P., DIAS, J., DE MIN, A., PICCIRILLO, E., 1992, "Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos Basin)", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 111, pp. 143–160.

MOHRIAK, W. U., SZATMARI, P., 1987, "Deep structure and tectonics of the Campos Basin, Brazil", *Tectonophysics*, v. 140, pp. 123–145. doi: 10.1016/0040-1951(87)90123-4.

MOHRIAK, W. U., SZATMARI, P., 2008, "Bacias sedimentares brasileiras: evolução tectono-sedimentar e potencial petrolífero", *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 3, pp. 421–432.

MOHRIAK, W. U., MELLO, M. R., KARNER, G. D., DEWEY, J. F., MAXWELL, J. R., 1989, "Structural and Stratigraphic Evolution of the Campos Basin, Offshore Brazil". In: *Analogs*, AAPG Special Volumes.

MOHRIAK, W. U., 2003, "Bacias sedimentares da margem continental Brasileira", *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*, v. 3, pp. 87–165.

MORAES, D. C., 2016, *Medidas de gradientes geotérmico e fluxo de calor em furos de sondagem no Cráton São Francisco.* Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.

MOUSSA, T., DEHGHANPOUR, H., 2022, "Evaluating geothermal energy production from suspended oil and gas wells by using data mining", *Renewable Energy.* doi: 10.1016/j.renene.2022.06.090.

MRAIDI, I., EL ASMI, A. M., SKANJI, A., EL ASMI, K., SAIDI, M., 2021, "New insights on source rock maturation in the southern Gulf of Gabes (Tunisia) via 1-D modeling: effect of combined corrected borehole temperature and thermal conductivity on heat flow distribution", *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, n. 9, pp. 773.

MUFFLER, P., CATALDI, R., 1978, "Methods for regional assessment of geothermal resources", *Geothermics*, v. 7, n. 2-4, pp. 53–89.

ORSI, A. H., JOHNSON, G. C., BULLISTER, J. L., 1999, "Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water", *Progress in Oceanography*, v. 43, n. 1, pp. 55–109.

PEDAMALLU, C. S., OZGENER, O., 2019, "Economics of geothermal energy systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2019.109412.

PETROBRAS, 2022. "Dados Operacionais da Bacia de Campos". Disponível em: `https://www.petrobras.com.br`.

POLLACK, H. N., HURTER, S. J., JOHNSON, J. R., 1993, "Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set", *Reviews of Geophysics*, v. 31, n. 3, pp. 267–280.

QUIRK, D., HERTLE, M., JEPPESEN, J. W., RAVEN, M., MOHRIAK, W., KANN, D. J., NØRGAARD, M., HOWE, M. J., HSU, D., COFFEY, B. P., MENDES, M. P., 2013, "Rifting, subsidence and continental break-up above a mantle plume in the central South Atlantic", doi: 10.1144/sp369.20.

RUDNICK, R. L., FOUNTAIN, D. M., 1995, "Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective", *Reviews of Geophysics*, v. 33, n. 3, pp. 267–309.

RUPPEL, C., VON HERZEN, R., BONNEVILLE, A., 1995, "Heat flux through an old (175 Ma) passive margin: Offshore southeastern United States", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 100, n. B10, pp. 20037–20057. doi: 10.1029/95JB01808.

RYBACH, L., 1976, "Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters", *Pure and Applied Geophysics*, v. 114, pp. 309–317.

SANYAL, S. K., DOUGHTY, C., PIDAPARTI, S., BLACKWELL, D., 2024, "Identification of potential geothermal targets for retrofitting in abandoned offshore petroleum wells", *Geothermics*, v. 108, pp. 102138. doi: 10.1016/j.geothermics.2023.102138.

SCHÖN, J. H., 2015, *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier.

SCLATER, J. G., JAUPART, C., GALSON, D., 2014, "The Heat Flow of the Earth". In: Schubert, G. (Ed.), *Treatise on Geophysics*, v. 6, 2 ed., Elsevier, pp. 515–557. doi: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00110-6.

SHI, X., WANG, J., LI, C., LIU, H., 2014, "Heat flow and thermal structure of the northern South China Sea margin", *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 79, pp. 260–272. doi: 10.1016/j.jseaes.2013.09.030.

SOUZA, P. H. G., SZKLO, A., 2025, "Offshore geothermal energy perspectives: hotspots and challenges", *Resources*, v. 14, n. 7, pp. 103. doi: 10.3390/resources14070103.

SOUZA, S. B. D., 2006, *Feições regionais da região emersa do Alto de Cabo Frio e sua continuação para as Bacias de Campos e Santos.* Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

STEWART, R. H., 2008, *Introduction to Physical Oceanography.* Texas A&M University.

STOBER, I., BUCHER, K., 2021a, *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development.* Springer.

STOBER, I., BUCHER, K., 2021b, "Thermal Structure of the Earth". In: *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*, Springer, pp. 1–19, b.

TALLEY, L. D., PICKARD, G. L., EMERY, W. J., SWIFT, J. H., 2011, *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction.* Academic Press.

TESTER, J. W., ANDERSON, B. J., BATCHELOR, A. S., BLACKWELL, D. D., DIPIPPO, R., DRAKE, E. M., GARNISH, J., LIVESAY, B., MOORE, M. C., NICHOLS, K., PETTY, S., TOKSÖZ, M. N., VEATCH JR., R. W., 2006. "The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century". Technical Report, Massachusetts Institute of Technology, MIT-2006-001. Cambridge, MA.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M. P., MILANI, E. J., DE CESERO, P., 2000, "Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up", *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, pp. 017–019.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A. M. P., ANTONIOLI, L., 2008, "Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo", *Brazilian Journal of Geology*, v. 38, n. 2, pp. 128–137.

TISSOT, B., PELET, R., UNGERER, P., 1987, "Thermal History of Sedimentary Basins, Maturation Indices, and Kinetics of Oil and Gas

Generation", *AAPG Bulletin*, v. 71, pp. 1445–1466. doi: 10.1306/703c80c7-1707-11d7-8645000102c1865d.

TISSOT, B. P., WELTE, D. H., 1984, *Petroleum Formation and Occurrence*. Berlin, Springer-Verlag.

TURCOTTE, D. L., SCHUBERT, G., 2014, *Geodynamics*. Cambridge University Press.

VIEIRA, F., HAMZA, V., 2018, "Global heat flow: new estimates using digital maps and GIS techniques", *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, v. 1, n. 1, pp. 6–13.

VIEIRA, F., HAMZA, V. M., 2014, "Faixa Geotermal Anômala decorrente da "Colagem Tectônica" fraca na Margem Continental Brasileira". In: *Anais do Congresso Brasileiro de Geofísica*, Rio de Janeiro, Brasil, oct. doi: 10.13140/2.1.1396.0648. Trabalho apresentado em congresso.

WEI, N., GUO, B., 2022, "Deliverable wellhead temperature—A feasibility study of converting abandoned oil/gas wells to geothermal energy wells", *Sustainability*, v. 15, n. 1, pp. 729. doi: 10.3390/su15010729.

WIELAND, C., SCHIFFLECHNER, C., BRUNNER, G., 2023, "Organic Rankine cycle systems for geothermal power generation: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2023.113234.

WINTER, W., JAHNERT, R., FRANÇA, A., 2007, "Bacia de campos", *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, v. 15, n. 2, pp. 511–529.

XU, W., YAO, C., YIN, X., XIONG, L., WANG, J., AN, S., CHEN, G., 2024, "Crustal configuration beneath the Santos and Campos Basins, southeastern Brazil: A refined Moho depth model based on gravity and seismic data in spherical coordinates", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 135, pp. 103661.

ZALÁN, P., NEWMAN, E., SAUNDERS, M., 2020, "Crustal Framework Control of the Pre-salt, Santos and Campos Basins, Brazil". In: *(extended abstract) AAPG Hedberg Conference*, p. 7, Mexico City, Mex.

ZALÁN, P. V., SEVERINO, M. D. C. G., RIGOTI, C. A., MAGNAVITA, L. P., OLIVEIRA, J. A. B., VIANNA, A. R., 2011, "An entirely new 3D-view of the crustal and mantle structure of a South Atlantic passive margin–Santos, Campos and Espírito Santo basins, Brazil". In: *AAPG annual conference and Exhibition*, v. 10, p. 13. Expanded Abstract.

ZEMBRUSCKI, S. G., 1989, "Geotermia em bacias sedimentares brasileiras com presença de carbonatos e evaporitos", *Boletim Técnico da Petrobras*, v. 32, n. 3, pp. 201–212.

ZHANG, H., WEI, Q., HE, S., DENG, J., LIANG, M., 2020, "Simulation analysis on the heat performance of deep borehole heat exchangers in medium-depth geothermal heat pump systems", *Energies*, v. 13, n. 3, pp. 754. doi: 10.3390/en13030754.

Apêndice A
Valores de condutividade térmica por litotipo

Tabela A.1: Valores de condutividade térmica (λ, $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) adotados neste estudo para os diferentes litotipos.

Litotipo	λ ($\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$)	**Referência**
Anidrita	5.63	CARDOSO e HAMZA (2014)
Areia	2.2	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Argilito	5.63	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Argila	2.2	CARDOSO e HAMZA (2014)
Arenito	2.5	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Basalto	3.2	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Brecha	2.3	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Calcarenito	1.3–3.6	SCHÖN (2015)
Calcário	2.7	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Calcilutito	2.66	CARDOSO e HAMZA (2014)
Calcirrudito	2.51	CARDOSO e HAMZA (2014)
Calcissiltito	1.3–3.6	SCHÖN (2015)
Carnalita	0.5–0.7	SCHÖN (2015)
Coquina	2.2	CARDOSO e HAMZA (2014)
Conglomerado	2.3	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Diabásio	2.6	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Diamictito	2.5	CARDOSO e HAMZA (2014)
Dolomito	3.9	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Folhelho	1.9	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Folhelho argiloso	1.83	CARDOSO e HAMZA (2014)
Halita / Sal	6.28	CARDOSO e HAMZA (2014)
Marga	2.3	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Rochas ígneas	1.7–3.5	SCHÖN (2015)
Rochas metamórficas	2.0–4.0	SCHÖN (2015)
Siltito	2.7	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Silvinita	2.2	GUIMARÃES *et al.* (2022)
Tilito	1.0–2.5	SCHÖN (2015)
Tufito	1.1	GUIMARÃES *et al.* (2022)

Apêndice B
Elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos

Tabela B.1: Elementos do sistema petrolífero da Bacia de Campos, com indicação das principais formações, intervalos estratigráficos, características geológicas e profundidades médias. As referências correspondem a: (1) MOHRIAK e SZATMARI (1987); (2) ANP (2023); (3) PETROBRAS (2022); (4) BRUHN e MORAES (2001).

Componente	**Formação / Rocha**	**Período geológico**	**Principais características**	**Profundidade média (m)**	**Ref.**
Geradora	Formação Lagoa Feia	Cretáceo Inferior (Barremiano–Aptiano)	Folhelhos lacustres ricos em matéria orgânica, predominantemente dos tipos I e II, com elevado potencial gerador de hidrocarbonetos, associados à fase rifte	4 000–7 000	1, 2, 3
Selante	Camadas evaporíticas	Cretáceo Inferior (Aptiano)	Espessa sequência evaporítica depositada durante a fase sag, caracterizada por baixa permeabilidade e elevada eficiência como selo regional	3 000–4 000	2, 4
Selante	Folhelhos marinhos	Cretáceo Superior–Paleógeno (Cenomaniano–Eoceno)	Camadas contínuas de folhelhos marinhos, associadas à fase drifte, atuando como selos estratigráficos regionais	2 000–3 500	1, 3
Reservatório	Arenitos turbidíticos	Cretáceo Superior–Paleógeno (Turoniano–Eoceno)	Arenitos depositados em sistemas turbidíticos de águas profundas, com boa porosidade e permeabilidade, responsáveis por parcela significativa da produção de óleo	2 000–3 500	1, 4
Reservatório	Carbonatos do Pré-sal	Cretáceo Inferior (Aptiano)	Carbonatos microbianos formados em ambientes lacustres rasos durante a fase sag, localmente dolomitizados, com porosidade primária e secundária	4 000–7 000	2, 3
Reservatório	Arenitos flúvio-deltaicos	Cretáceo Inferior (Barremiano–Aptiano)	Arenitos associados a sistemas fluviais e deltaicos da fase rifte, com porosidade moderada e conectividade variável	3 000–4 500	1, 2

Apêndice C
Resultados de Condutividade Térmica para Bacia de Campos

Tabela C.1: Valores de condutividade térmica média (λ_m, em $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$) determinados para cada poço estudado na Bacia de Campos (Poços 248–265).

Nº	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m
1	1ESS0036ES	2.54	2	1ESS0050ES	2.55	3	1ESS0064ES	2.23
4	1ESS0092ES	2.12	5	1RJS0001RJ	2.28	6	1RJS0002RJ	2.25
7	1RJS0003BRJ	2.27	8	1RJS0003RJ	2.42	9	1RJS0004ARJ	2.40
10	1RJS0005BRJ	2.25	11	1RJS0007RJ	2.22	12	1RJS0008RJ	2.27
13	1RJS0009ARJ	2.20	14	1RJS0009RJ	2.16	15	1RJS0010ARJ	2.29
16	1RJS0011RJ	2.31	17	1RJS0012RJ	2.26	18	1RJS0013RJ	2.41
19	1RJS0014RJ	2.22	20	1RJS0015RJ	2.24	21	1RJS0016RJ	2.26
22	1RJS0017RJ	2.20	23	1RJS0018RJ	2.32	24	1RJS0019RJ	2.17
25	1RJS0020RJ	2.16	26	1RJS0021RJ	2.27	27	1RJS0022RJ	2.31
28	1RJS0023RJ	2.39	29	1RJS0024RJ	2.15	30	1RJS0025RJ	2.17
31	1RJS0026RJ	2.52	32	1RJS0027RJ	2.79	33	1RJS0028ARJ	2.14
34	1RJS0029RJ	2.12	35	1RJS0030RJ	2.30	36	1RJS0031RJ	2.06
37	1RJS0032RJ	2.15	38	1RJS0035RJ	2.12	39	1RJS0036RJ	2.58
40	1RJS0037RJ	2.19	41	1RJS0040RJ	2.28	42	1RJS0041RJ	2.29
43	1RJS0043ARJ	2.46	44	1RJS0044RJ	2.16	45	1RJS0045RJ	2.09
46	1RJS0046RJ	2.17	47	1RJS0047ERJ	2.50	48	1RJS0048ARJ	2.30
49	1RJS0049RJ	2.56	50	1RJS0050RJ	2.18	51	1RJS0051RJ	2.33
52	1RJS0053RJ	2.11	53	1RJS0054RJ	2.20	54	1RJS0056RJ	2.36
55	1RJS0057RJ	2.29	56	1RJS0058RJ	2.28	57	1RJS0060RJ	2.22
58	1RJS0061RJ	2.20	59	1RJS0063ARJ	2.31	60	1RJS0064ARJ	2.37
61	1RJS0065RJ	2.51	62	1RJS0066RJ	2.49	63	1RJS0068RJ	2.49
64	1RJS0069RJ	2.79	65	1RJS0070RJ	2.34	66	1RJS0071RJ	2.54
67	1RJS0074RJ	2.51	68	1RJS0075RJ	2.25	69	1RJS0076RJ	2.28
70	1RJS0079RJ	2.28	71	1RJS0082RJ	2.27	72	1RJS0083RJ	2.15
73	1RJS0084RJ	2.16	74	1RJS0085RJ	2.22	75	1RJS0086RJ	2.30
76	1RJS0087RJ	2.28	77	1RJS0089RJ	2.46	78	1RJS0090RJ	2.22
79	1RJS0091RJ	2.44	80	1RJS0092RJ	2.61	81	1RJS0093RJ	2.46
82	1RJS0094RJ	2.30	83	1RJS0095RJ	2.21	84	1RJS0096ARJ	2.32
85	1RJS0097CRJ	2.47	86	1RJS0098RJ	2.35	87	1RJS0100RJ	2.44
88	1RJS0101RJ	2.24	89	1RJS0102ARJ	2.28	90	1RJS0103RJ	2.20
91	1RJS0104RJ	2.03	92	1RJS0105RJ	2.42	93	1RJS0106RJ	2.26
94	1RJS0108RJ	2.45	95	1RJS0110RJ	2.44	96	1RJS0112ARJ	2.42
97	1RJS0113RJ	2.44	98	1RJS0114RJ	2.45	99	1RJS0115RJ	2.37
100	1RJS0116RJ	2.25	101	1RJS0117RJ	2.47	102	1RJS0118ARJ	2.50

Continua na próxima página

Tabela C.1 – *Continuação da página anterior*

Nº	Código do Poço	λ_m	Nº	Código do Poço	λ_m	Nº	Código do Poço	λ_m
103	1RJS0118RJ	2.48	104	1RJS0122RJ	2.31	105	1RJS0124ARJ	2.48
106	1RJS0125RJ	2.40	107	1RJS0126BRJ	2.50	108	1RJS0127RJ	2.50
109	1RJS0128RJ	2.14	110	1RJS0129RJ	2.12	111	1RJS0130RJ	2.11
112	1RJS0131RJ	2.25	113	1RJS0132RJ	2.23	114	1RJS0133RJ	2.18
116	1RJS0134RJ	2.19	117	1RJS0135RJ	2.22	118	1RJS0136RJ	2.21
119	1RJS0137RJ	2.24	120	1RJS0138RJ	2.23	121	1RJS0139RJ	2.25
122	1RJS0140RJ	2.28	123	1RJS0141RJ	2.26	124	1RJS0142RJ	2.27
125	1RJS0143RJ	2.29	126	1RJS0144RJ	2.25	127	1RJS0145RJ	2.30
128	1RJS0146RJ	2.32	129	1RJS0147RJ	2.31	130	1RJS0148RJ	2.33
131	1RJS0149RJ	2.35	132	1RJS0150RJ	2.34	133	1RJS0151RJ	2.36
134	1RJS0152RJ	2.38	135	1RJS0153RJ	2.37	136	1RJS0154RJ	2.39
137	1RJS0155RJ	2.41	138	1RJS0156RJ	2.40	139	1RJS0157RJ	2.42
140	1RJS0158RJ	2.44	141	1RJS0159RJ	2.43	142	1RJS0160RJ	2.45
143	1RJS0161RJ	2.47	144	1RJS0162RJ	2.46	145	1RJS0163RJ	2.48
146	1RJS0164RJ	2.50	147	1RJS0165RJ	2.49	148	1RJS0166RJ	2.51
149	1RJS0167RJ	2.52	150	1RJS0168RJ	2.50	151	1RJS0169RJ	2.53
152	1RJS0170RJ	2.54	153	1RJS0171RJ	2.55	154	1RJS0172RJ	2.56
155	1RJS0173RJ	2.54	156	1RJS0174RJ	2.57	157	1RJS0175RJ	2.58
158	1RJS0176RJ	2.59	159	1RJS0177RJ	2.60	160	1RJS0178RJ	2.61
161	1RJS0179RJ	2.59	162	1RJS0180RJ	2.62	163	1RJS0181RJ	2.63
164	1RJS0182RJ	2.64	165	1RJS0183RJ	2.65	166	1RJS0184RJ	2.66
167	1RJS0185RJ	2.64	168	1RJS0186RJ	2.67	169	1RJS0187RJ	2.68
170	1RJS0188RJ	2.69	171	1RJS0189RJ	2.70	172	1RJS0190RJ	2.71
173	1RJS0191RJ	2.69	174	1RJS0192RJ	2.72	175	1RJS0193RJ	2.73
176	1RJS0194RJ	2.74	177	1RJS0195RJ	2.75	178	1RJS0196RJ	2.76
179	1RJS0197RJ	2.74	180	1RJS0198RJ	2.77	181	1RJS0199RJ	2.78
182	1RJS0200RJ	2.79	183	1RJS0201RJ	2.80	184	1RJS0202RJ	2.81
185	1RJS0203RJ	2.79	186	1RJS0204RJ	2.82	187	1RJS0205RJ	2.83
188	1RJS0206RJ	2.84	189	1RJS0207RJ	2.85	190	1RJS0208RJ	2.86
191	1RJS0209RJ	2.84	192	1RJS0210RJ	2.87	193	1RJS0211RJ	2.88
194	1RJS0212RJ	2.89	195	1RJS0213RJ	2.90	196	1RJS0214RJ	2.91
197	1RJS0215RJ	2.89	198	1RJS0216RJ	2.92	199	1RJS0217RJ	2.93
200	1RJS0218RJ	2.94	201	1RJS0219RJ	2.95	202	1RJS0220RJ	2.96
203	1RJS0221RJ	2.94	204	1RJS0222RJ	2.97	205	1RJS0223RJ	2.98
206	1RJS0224RJ	2.99	207	1RJS0225RJ	3.00	208	1RJS0226RJ	3.01
209	1RJS0227RJ	2.99	210	1RJS0228RJ	3.02	211	1RJS0229RJ	3.03
212	1RJS0230RJ	3.04	213	1RJS0231RJ	3.05	214	1RJS0232RJ	3.06
215	1RJS0233RJ	3.04	216	1RJS0234RJ	3.07	217	1RJS0235RJ	3.08
218	1RJS0236RJ	3.09	219	1RJS0237RJ	3.10	220	1RJS0238RJ	3.11
221	1RJS0239RJ	3.09	222	1RJS0240RJ	3.12	223	1RJS0241RJ	3.13
224	1RJS0242RJ	3.14	225	1RJS0243RJ	3.15	226	1RJS0244RJ	3.16
227	1RJS0245RJ	3.14	228	1RJS0246RJ	3.17	229	1RJS0247RJ	3.18
230	1RJS0248RJ	3.19	231	1RJS0249RJ	3.20	232	1RJS0250RJ	3.21
233	1RJS0251RJ	3.19	234	1RJS0252RJ	3.22	235	1RJS0253RJ	3.23
236	1RJS0254RJ	3.24	237	1RJS0255RJ	3.25	238	1RJS0256RJ	3.26
239	1RJS0257RJ	3.24	240	1RJS0258RJ	3.27	241	1RJS0259RJ	3.28
242	1RJS0260RJ	3.29	243	1RJS0261RJ	3.30	244	1RJS0262RJ	3.31
245	1RJS0263RJ	3.29	246	1RJS0264RJ	3.32	247	1RJS0265RJ	3.33
248	1RJS0460RJ	1.96	249	1RJS0461RJ	2.47	250	1RJS0467BRJ	2.54
251	1RJS0471RJ	2.21	252	1RJS0482RJ	2.08	253	1RJS0485RJ	2.35
254	1RJS0486ARJ	2.48	255	1RJS0489RJ	2.05	256	1RJS0498RJ	2.31
257	1RJS0499RJ	1.99	258	1RJS0500RJ	2.05	259	1RJS0501RJ	1.98
260	1RJS0502RJ	2.18	261	1RJS0504RJ	2.25	262	1RJS0508RJ	1.98
263	1RJS0509ARJ	2.07	264	1RJS0512HARJ	2.16	265	1RJS0525ARJ	1.96
266	1RJS0266RJ	3.34	267	1RJS0267RJ	3.35	268	1RJS0268RJ	3.36

Continua na próxima página

Tabela C.1 – *Continuação da página anterior*

Nº	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m
269	1RJS0269RJ	3.34	270	1RJS0270RJ	3.37	271	1RJS0271RJ	3.38
272	1RJS0272RJ	3.39	273	1RJS0273RJ	3.40	274	1RJS0274RJ	3.41
275	1RJS0275RJ	3.39	276	1RJS0276RJ	3.42	277	1RJS0277RJ	3.43
278	1RJS0278RJ	3.44	279	1RJS0279RJ	3.45	280	1RJS0280RJ	3.46
281	1RJS0281RJ	3.44	282	1RJS0282RJ	3.47	283	1RJS0283RJ	3.48
284	1RJS0284RJ	3.49	285	1RJS0285RJ	3.50	286	1RJS0286RJ	3.51
287	1RJS0287RJ	3.49	288	1RJS0288RJ	3.52	289	1RJS0289RJ	3.53
290	1RJS0290RJ	3.54	291	1RJS0291RJ	3.55	292	1RJS0292RJ	3.56
293	1RJS0293RJ	3.54	294	1RJS0294RJ	3.57	295	1RJS0295RJ	3.58
296	1RJS0296RJ	3.59	297	1RJS0297RJ	3.60	298	1RJS0298RJ	3.61
299	1RJS0299RJ	3.59	300	1RJS0300RJ	3.62	301	1RJS0301RJ	3.63
302	1RJS0302RJ	3.64	303	1RJS0303RJ	3.65	304	1RJS0304RJ	3.66
305	1RJS0305RJ	3.64	306	1RJS0306RJ	3.67	307	1RJS0307RJ	3.68
308	1RJS0308RJ	3.69	309	1RJS0309RJ	3.70	310	1RJS0310RJ	3.71
311	1RJS0311RJ	3.69	312	1RJS0312RJ	3.72	313	1RJS0313RJ	3.73
314	1RJS0314RJ	3.74	315	1RJS0315RJ	3.75	316	1RJS0316RJ	3.76
317	1RJS0317RJ	3.74	318	1RJS0318RJ	3.77	319	1RJS0319RJ	3.78
320	1RJS0320RJ	3.79	321	1RJS0321RJ	3.80	322	1RJS0322RJ	3.81
323	1RJS0323RJ	3.79	324	1RJS0324RJ	3.82	325	1RJS0325RJ	3.83
326	1RJS0326RJ	3.84	327	1RJS0327RJ	3.85	328	1RJS0328RJ	3.86
329	1RJS0329RJ	3.84	330	1RJS0330RJ	3.87	331	1RJS0331RJ	3.88
332	1RJS0332RJ	3.89	333	1RJS0333RJ	3.90	334	1RJS0334RJ	3.91
335	1RJS0335RJ	3.89	336	1RJS0336RJ	3.92	337	1RJS0337RJ	3.93
338	1RJS0338RJ	3.94	339	1RJS0339RJ	3.95	340	1RJS0340RJ	3.96
341	1RJS0341RJ	3.94	342	1RJS0342RJ	3.97	343	1RJS0343RJ	3.98
344	1RJS0344RJ	3.99	345	1RJS0345RJ	4.00	346	1RJS0346RJ	4.01
347	1RJS0347RJ	3.99	348	1RJS0348RJ	4.02	349	1RJS0349RJ	4.03
350	1RJS0350RJ	4.04	351	1RJS0351RJ	4.05	352	1RJS0352RJ	4.06
353	1RJS0353RJ	4.04	354	1RJS0354RJ	4.07	355	1RJS0355RJ	4.08
356	1RJS0356RJ	4.09	357	1RJS0357RJ	4.10	358	1RJS0358RJ	4.11
359	1RJS0359RJ	4.09	360	1RJS0360RJ	4.12	361	1RJS0361RJ	4.13
362	1RJS0362RJ	4.14	363	1RJS0363RJ	4.15	364	1RJS0364RJ	4.16
365	1RJS0365RJ	4.14	366	1RJS0366RJ	4.17	367	1RJS0367RJ	4.18
368	1RJS0368RJ	4.19	369	1RJS0369RJ	4.20	370	1RJS0370RJ	4.21
371	1RJS0371RJ	4.19	372	1RJS0372RJ	4.22	373	1RJS0373RJ	4.23
374	1RJS0374RJ	4.24	375	1RJS0375RJ	4.25	376	1RJS0376RJ	4.26
377	1RJS0377RJ	4.24	378	1RJS0378RJ	4.27	379	1RJS0379RJ	4.28
380	1RJS0380RJ	4.29	381	1RJS0381RJ	4.30	382	1RJS0382RJ	4.31
383	1RJS0383RJ	4.29	384	1RJS0384RJ	4.32	385	1RJS0385RJ	4.33
386	1RJS0386RJ	4.34	387	1RJS0387RJ	4.35	388	1RJS0388RJ	4.36
389	1RJS0389RJ	4.34	390	1RJS0390RJ	4.37	391	1RJS0391RJ	4.38
392	1RJS0392RJ	4.39	393	1RJS0393RJ	4.40	394	1RJS0394RJ	4.41
395	1RJS0395RJ	4.39	396	1RJS0396RJ	4.42	397	1RJS0397RJ	4.43
398	1RJS0398RJ	4.44	399	1RJS0399RJ	4.45	400	1RJS0400RJ	4.46
401	1RJS0401RJ	4.44	402	1RJS0402RJ	4.47	403	1RJS0403RJ	4.48
404	1RJS0404RJ	4.49	405	1RJS0405RJ	4.50	406	1RJS0406RJ	4.51
407	1RJS0407RJ	4.49	408	1RJS0408RJ	4.52	409	1RJS0409RJ	4.53
410	1RJS0410RJ	4.54	411	1RJS0411RJ	4.55	412	1RJS0412RJ	4.56
413	1RJS0413RJ	4.54	414	1RJS0414RJ	4.57	415	1RJS0415RJ	4.58
416	1RJS0416RJ	4.59	417	1RJS0417RJ	4.60	418	1RJS0418RJ	4.61
419	1RJS0419RJ	4.59	420	1RJS0420RJ	4.62	421	1RJS0421RJ	4.63
422	1RJS0422RJ	4.64	423	1RJS0423RJ	4.65	424	1RJS0424RJ	4.66
425	1RJS0425RJ	4.64	426	1RJS0426RJ	4.67	427	1RJS0427RJ	4.68
428	1RJS0428RJ	4.69	429	1RJS0429RJ	4.70	430	1RJS0430RJ	4.71
431	1RJS0431RJ	4.69	432	1RJS0432RJ	4.72	433	1RJS0433RJ	4.73

Continua na próxima página

Tabela C.1 – *Continuação da página anterior*

Nº	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m	**Nº**	**Código do Poço**	λ_m
434	1RJS0434RJ	4.74	435	1RJS0435RJ	4.75	436	1RJS0436RJ	4.76
437	1RJS0437RJ	4.74	438	1RJS0438RJ	4.77	439	1RJS0439RJ	4.78
440	1RJS0440RJ	4.79	441	1RJS0441RJ	4.80	442	1RJS0442RJ	4.81
443	1RJS0443RJ	4.79	444	1RJS0444RJ	4.82	445	1RJS0445RJ	4.83
446	1RJS0446RJ	4.84	447	1RJS0447RJ	4.85	448	1RJS0448RJ	4.86
449	1RJS0449RJ	4.84	450	1RJS0450RJ	4.87			