

SIDNEY GONÇALO  
(Organizador)

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA

Atena  
Editora  
Ano 2021

SIDNEY GONÇALO  
(Organizador)

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA

Atena  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Fósseis moleculares e aplicações em geoquímica orgânica

**Diagramação:** Daphynny Pamplona  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Sidney Gonçalves de Lima

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F752 Fósseis moleculares e aplicações em geoquímica orgânica /  
Organizador Sidney Gonçalves de Lima. – Ponta Grossa -  
PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-815-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.158220601>

1. Fósseis moleculares. 2. Geoquímica orgânica. I.  
Lima, Sidney Gonçalves de (Organizador). II. Título.

CDD 561

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2021

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

Fósseis Moleculares ou biomarcadores em amostras geológicas, são produtos derivados de precursores bioquímicos (biopolímeros) por processos diagenéticos (processos redox), os quais tem sido aplicado a estudos ambientais, análise forense e, em especial, na avaliação de sistemas petrolíferos. Tais compostos são alvos da Geoquímica Orgânica, tornando-se uma das ferramentas indispensável na exploração do petróleo, graças ao avanço, também, de técnicas cromatográficas de separação e análise.

O desenvolvimento de um estudo sistemático da composição orgânica dos sedimentos e petróleo experimentou um grande incremento nas últimas décadas. O desenvolvimento de novas técnicas analíticas instrumentais de CG-EM e CG/EM/EM compõem o fator determinante. São instrumentos que propiciam a caracterização molecular em microquantidades de misturas orgânicas altamente complexas, possibilitando contornar problemas de co-eluição e obter informações mais confiáveis sobre a identidade e quantidade dos biomarcadores.

Na presente edição denominada “**Fósseis Moleculares e Aplicações em Geoquímica Orgânica**”, apresenta-se alguns estudos teóricos e práticos, desenvolvidos em diferentes instituições de ensino e pesquisa, com óleos e rochas de Bacias Sedimentares Brasileiras.

Apresenta-se uma série de 14 artigos, referentes à análise de óleos e matéria orgânica de sedimentos, com diferentes abordagens, metodologias. Há, por exemplo, trabalhos de revisão sobre biomarcadores e suas aplicações, cálculos teórico-computacionais para prever a estrutura de asfaltenos, análise de hidrocarbonetos poliaromáticos em sedimentos recentes e, ainda, alguns estudos, correlacionando biomarcadores ao paleo-ambiente deposicional, a origem da matéria orgânica (marinha, lacustre), a fonte, a biodegradação e/ou a maturidade de amostras geológicas.

Sidney Gonçalo de Lima

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **ANÁLISE DE BIOMARCADORES EM ROCHAS CRETÁCEAS DA BACIA DE SÃO LUIS**

Andrenilton Ferreira Silva  
Artur Leal Carvalho Barros  
Anita Jocelyne Marsaioli  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206011>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

#### **ANÁLISE DE BIOMARCADORES NEUTROS EM SEDIMENTO DA FORMAÇÃO SERRA ALTA - PERMIANO (BACIA DO PARANÁ)**

Lorena Tuane Gomes de Almeida  
Ailton da Silva Brito  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206012>

### **CAPÍTULO 3..... 27**

#### **ANÁLISE DE HIDROCARBONETOS SATURADOS E CAROTENOIDES AROMÁTICOS EM AMOSTRA DE FOLHELHO DAS CAMADAS BATATEIRA, BACIA DO ARARIPE**

Artur Leal de Carvalho Barros  
Andrenilton Ferreira Silva  
Gustavo Rodrigues de Sousa Junior  
André Luiz Durante Spigolon  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206013>

### **CAPÍTULO 4..... 42**

#### **APLICAÇÃO DOS CROMANS NA AVALIAÇÃO DA SALINIDADE E INFLUXO DE ÁGUA DOCE EM FOLHELHOS DA FORMAÇÃO IRATI, BACIA DO PARANÁ**

Laercio Lopes Martins  
Caroline Adolphsson do Nascimento  
Georgiana Feitosa da Cruz  
Hélio Jorge Portugal Severiano Ribeiro  
Eliane Soares de Souza  
Hans-Martin Schulz

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206014>

### **CAPÍTULO 5..... 59**

#### **AVALIAÇÃO DA ORIGEM E EVOLUÇÃO TÉRMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA REGISTRADA EM FÁCIES DA FORMAÇÃO IRATI AFETADAS POR INTRUSÕES ÍGNEAS (REGISTRO PERMIANO DA PORÇÃO NORTE DA BACIA DO PARANÁ), UTILIZANDO-SE BIOMARCADORES**

Lucas Pinto Heckert Bastos  
Danielle da Costa Cavalcante  
Celma Jorge de Menezes

Carmen Lucia Ferreira Alferes  
Debora Bonfim Neves da Silva  
Andressa Oishi  
René Rodrigues  
Egberto Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206015>

**CAPÍTULO 6..... 77**

BIOMARCADORES PRESERVADOS EM CARBONATOS NEOPROTEROZOICOS REGISTRADOS NA FAZENDA ARRECIFE (FORMAÇÃO SALITRE) – BAHIA

Erika Gomes Martins  
Danielle da Costa Cavalcante  
Debora Bon im Neves da Silva  
Egberto Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206016>

**CAPÍTULO 7..... 94**

CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES ÁCIDOS EM PETRÓLEOS BIODEGRADADOS: COMPARATIVO ENTRE EXTRAÇÃO EM FASE SÓLIDA (SPE) E CROMATOGRAFIA EM COLUNA DE EXTRAÇÃO CONTÍNUA

Georgiana Feitosa da Cruz  
Lívia Carvalho Santos  
Laercio Lopes Martins  
Luana Pontes Gouveia  
Alexsandro Araujo da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206017>

**CAPÍTULO 8..... 111**

COMPOSTOS POLARES EM PETRÓLEO APLICADOS A PROCESSOS GEOCROMATOGRÁFICOS

Paulo Cesar Muniz de Lacerda Miranda  
Christian Rocque Souto Maior  
Sidney Gonçalo de Lima  
Gustavo Rodrigues de Sousa Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206018>

**CAPÍTULO 9..... 123**

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS INTERVALOS *OIL SHALE* PERMIANOS DA BACIA DO PARANÁ

Ailton da Silva Brito  
Lorena Tuane Gomes de Almeida  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206019>

**CAPÍTULO 10..... 133**

ESTUDO *IN SILICO* DE ESTRUTURAS ASFALTÊNICAS UTILIZANDO DINÂMICA

**MOLECULAR E TEORIA DO FUNCIONAL DA DENSIDADE**

Moisés Pereira de Araujo  
Alexandre Araujo de Souza  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060110>

**CAPÍTULO 11..... 146**

**OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS EM ROCHAS SEDIMENTARES DA FORMAÇÃO CODÓ – CRETÁCEO (BACIA DO PARNAÍBA)**

Edymilaís da Silva Sousa  
Christian Dário Silva de Melo  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060111>

**CAPÍTULO 12..... 161**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS PARA SEPARAÇÃO DE COMPONENTES DE PETRÓLEOS BRASILEIROS POR CROMATOGRAFIA LÍQUIDA UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL**

Georgiana Feitosa da Cruz  
Jhonny Costa Carvalho  
Lívia Carvalho Santos  
Laercio Lopes Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060112>

**CAPÍTULO 13..... 180**

**CONTAMINANTES ORGÂNICOS PERSISTENTES EM SEDIMENTOS DO RIO PARNAÍBA, TERESINA – BRASIL**

Analine Daiany Costa Andrade  
Artur Leal de Carvalho Barros  
Michel Ricardo de Barros Chaves  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060113>

**CAPÍTULO 14..... 194**

**PRESERVAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS NO REGISTRO ESTRATIGRÁFICO E SUAS IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS**

Ailton da Silva Brito

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060114>

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 210**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 211**

## BIOMARCADORES PRESERVADOS EM CARBONATOS NEOPROTEROZOICOS REGISTRADOS NA FAZENDA ARRECIFE (FORMAÇÃO SALITRE) – BAHIA

*Data de aceite: 01/01/2022*

*Data de submissão: 10/10/2021*

### **Erika Gomes Martins**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
UERJ  
<http://lattes.cnpq.br/6385735872776462>

### **Danielle da Costa Cavalcante**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica, Universidade Estadual  
do Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/7446081252265215>

### **Debora Bonfim Neves da Silva**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
UERJ, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1545259890781031>

### **Egberto Pereira**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro,  
Faculdade de Geologia, Departamento de  
Estratigrafia e Paleontologia  
<http://lattes.cnpq.br/1043606043814998>

**RESUMO:** Este estudo enfoca a análise de biomarcadores em carbonatos neoproterozoicos registrados na Fazenda Arrecife, pertencente à Formação Salitre, Grupo Una (Bahia). Foram extraídas sete amostras de um furo contínuo (MC-2-BA), caracterizadas por fácies estromatolíticas, laminito crenulado e laminito liso. Os biomarcadores saturados foram analisados por GC-MS. As distribuições de biomarcadores retratam um ambiente que

apoiava uma comunidade microbiana diversa incluindo bactérias fototróficas, algas vermelhas e verdes e archaeas halofílicas. As baixas relações esterano / hopano em todas as amostras indicam que, embora os eucariotos estivessem presentes, uma comunidade microbiana representada por bactérias era dominante. Baseado na justaposição de condições anóxicas e redutoras, inferidas pela razão pristano/fitano, combinadas com condições óxicas, inferidas a partir da presença de homohopanos C31-C35, com grande predomínio dos compostos C31 e C32, é evidenciada uma estratificação redox para a Formação Salitre. As fácies laminito liso foram depositadas em um momento de menor salinidade da bacia, refletida principalmente pelas baixas abundâncias relativas dos isoprenoides i-25 e i-30 associada ao aumento expressivo dos terpanos tricíclicos. Em direção ao topo, onde são encontradas as fácies laminito crenulado e, mais próximas da superfície, fácies estromatolíticas, foram verificadas diminuição na abundância dos terpanos tricíclicos, associados ao aumento dos homohopanos e dos isoprenoides i-25 e i-30, sugerindo um ciclo de raseamento na bacia, com maior evaporação, resultando em águas de maior salinidade. As fácies microbiais também exibiram uma comunidade biológica ligeiramente distinta do laminito liso, representada por maior contribuição de algas eucariontes (refletida pela maior abundância relativa dos n-alcenos de alto peso molecular) e dos isoprenoides i-25 e i-30, possivelmente sendo uma resposta às condições ambientais de maior salinidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fazenda arrecife, formação salitre, microbialitos, biomarcadores, neoproterozoico.

## BIOMARKERS PRESERVED IN NEOPROTEROZOIC CARBONATES REGISTERED AT THE ARRECIFE FARM (SALITRE FORMATION) – BAHIA

**ABSTRACT:** This study focuses on the analysis of biomarkers in Neoproterozoic carbonates registered at the Arrecife Farm, belonging to the Salitre Formation, Una Group (Bahia). Seven samples were extracted from a continuous hole (MC-2-BA), characterized by stromatolitic facies, crenulated laminite and smooth laminite. Saturated biomarkers were analyzed by GC-MS. The biomarker distributions depict an environment that supported a diverse microbial community, including phototrophic bacteria, red and green algae, and halophilic archaea. The low sterane/hopane ratios in all samples indicate that, although eukaryotes were present, a microbial community represented by bacteria was dominant. Based on the juxtaposition of anoxic and reducing conditions, inferred by the pristane/phytane ratio, combined with oxic conditions, inferred from the presence of C31-C35 homohopanes, with a high predominance of C31 and C32 compounds, a redox stratification for the Salitre Formation gets evidenced. The smooth laminite facies got deposited when the basin had lower salinity, mainly reflected by the low relative abundances of the isoprenoids i-25 and i-30 associated with the significant increase in tricyclic terpanes. Toward the top, where crenulate laminite facies are established and, closer to the surface, stromatolitic facies, a decrease in the abundance of tricyclic terpanes was observed, associated with an increase in homohopanes and isoprenoids i-25 and i-30, suggesting a cycle shallowing in the basin, with greater evaporation, resulting in water with greater salinity. The microbial facies also exhibited a slightly distinct biological community from the smooth laminite, represented by a higher contribution of eukaryotic algae (reflected by the greater relative abundance of high molecular weight n-alkanes) and the i-25, and i-30 isoprenoids, possibly being a response to higher salinity environmental conditions.

**KEYWORDS:** Arrecife farm, salitre formation, microbialites, biomarkers, neoproterozoic.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os microbialitos podem ser descritos como estruturas organossedimentares, formadas pela atividade de micro-organismos juntamente com processos inorgânicos (Awramik e Grey, 2005).

A caracterização dessas estruturas antigas por observações diretas das comunidades de formação de tapetes originais é limitada pelo potencial de fossilização extremamente baixo da maioria dos micro-organismos, especialmente bactérias (Thiel *et. al.*, 1997).

Na ausência de microfósseis de diagnóstico, os fósseis moleculares (biomarcadores) detêm o maior potencial para elucidar as comunidades microbianas, seu ambiente e / ou a maturidade térmica das rochas sedimentares nas quais estão contidos.

O presente estudo foi realizado para obter uma melhor compreensão da evolução microbiana inicial dos microbialitos Neoproterozoicos da Fazenda Arrecife (Formação Salitre, Bahia).

Dentro deste contexto, analisamos os biomarcadores a fim de i) avaliar as condições ambientais presentes quando esses sedimentos foram depositados; ii) caracterizar a comunidade biológica contribuinte para a matéria orgânica preservada nessas rochas; iii)

comparar fácies microbialíticas (estromatólitos e laminito crenulado) com os carbonatos associados (laminito liso) para verificar se as diferenças faciológicas poderiam repercutir em características geoquímicas distintas em relação a origem da fonte.

## 2 | ÁREA DE ESTUDO

Os microbialitos, alvos dessa pesquisa, são encontrados na propriedade rural conhecida por “Fazenda Arrecife”, abrangendo uma área de cerca de 5 km<sup>2</sup>, inserida na região centro-norte do estado da Bahia, no município de Várzea Nova, no domínio fisiográfico da Chapada Diamantina Oriental, entre os paralelos 11° 00' e 11° 50' S e meridianos de 40° 15' e 41° 18" WGr (Figura 01).

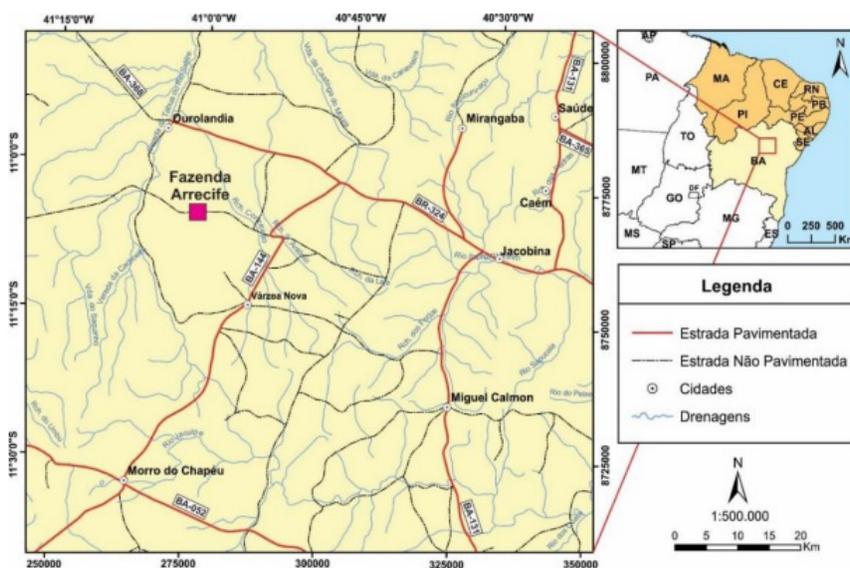


Figura 01: Localização da Fazenda Arrecife. Fonte: Lima, R. S. (2017).

### 2.1 Caracterização geológica regional

A Formação Salitre, em que estão inseridos os afloramentos observados na Fazenda Arrecife, localiza-se no interior do Cráton do São Francisco, o qual, segundo a conceituação de Almeida *et. al.* (1977), representa um extenso núcleo estabilizado no final do Proterozoico Inferior e limitado por “corredores” de rochas que foram deformadas durante o Ciclo Brasileiro, no Proterozoico Superior.

As rochas que afloram na Fazenda Arrecife pertencem à Bacia de Irecê e são coberturas Neoproterozoicas intracratônicas descontínuas inseridas no Grupo Una, que compreende as Formações Bebedouro, na base, e Salitre, no topo.

Os sedimentos da Formação Bebedouro são considerados de origem glácio-marinha por Guimarães (1996). Já a Formação Salitre, na qual está inserida a Fazenda Arrecife, é composta por carbonatos, depositados em um mar raso, epicontinental, em uma extensa plataforma, do tipo rampa carbonática, implantada após o evento glacial (Misi 1976; 1993).

## 2.2 Arcabouço Estrutural

As unidades situadas no Cráton São Francisco apresentam deformação e metamorfismo incipiente (ou mesmo ausente), tornando-se gradualmente mais deformada e metamórfica até atingir a região da faixa dobrada, impondo um limite gradativo entre o domínio cratônico e o domínio da faixa (Uhlein *et al.*, 2004).

As principais deformações que afetaram a Bacia de Irecê estão refletidas nos cavalgamentos e dobras assimétricas orientadas em torno de E–W, com vergência para sul. São deformações epidérmicas, originadas a partir dos esforços compressivos oriundos das faixas de dobramentos marginais Neoproterozoicas-Brasílicas, que penetram por dezenas de quilômetros no interior da região cratônica e redobram, localmente, estruturas pretéritas, representadas por dobras suaves e falhas orientadas N–S (Bizzi *et al.*, 2003).

## 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Amostragem

Foi realizada uma sondagem no entorno da Fazenda Arrecife (Furo MC-2-BA), que alcançou 182 m dentro da Formação Salitre. A partir de estudos prévios, foram selecionadas sete amostras, baseadas em sua faciologia e maiores valores de COT (Carbono Orgânico Total) (Tabela 1) para análise de biomarcadores, realizada no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (LGQM) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

A Formação Salitre se destaca pela abundância de microbialitos, de diversas naturezas e morfologias. Para caracterizar essa diversidade, foram escolhidas amostras de carbonatos microbiais pertencentes às fácies estromatólito e laminito crenulado, que exibem alternância de lâminas crenuladas milimétricas, convexas, com acúmulo de matéria orgânica associada aos biofilmes típicos dos microbialitos e amostras de carbonato de laminito liso, que exibem uma laminação bem definida, porém sem a crenulação observadas nas amostras anteriores.

Amostra	Profundidade (m)	Fácies	COT%
MC-2-BA	7,25	Estromatólito	0,26
	26		0,77
	52,4	Laminito crenulado	0,48
	96,5		0,30
	112,8	Laminito liso	0,13
	135,05		0,11
	157,3		0,05

Tabela 1: Amostras coletadas na Fazenda Arrecife.

### 3.2 Preparação das amostras

Os solventes utilizados foram n-hexano e diclorometano (DCM), de grau cromatográfico (mínimo de 99,9% de pureza, Merck®)

As vidrarias utilizadas ficaram submersas na solução detergente Extran® 5% por 24h. Após este período foram enxaguadas, no mínimo quatro vezes, com água corrente e depois com água deionizada MiliQ®.

As amostras de rocha foram maceradas manualmente, utilizando um gral de ágata e pistilo, até um tamanho de grão >80 mesh. Todo material utilizado na preparação das amostras foi lavado com água e detergente neutro e, depois, rinsado com solução hidroalcolica de etanol 92,5°GL e secos com auxílio de jato de ar comprimido, antes e entre as amostras.

Aproximadamente 150 g do pó de rocha de cada amostra foram extraídos por 48 horas com diclorometano em um aparelho Soxhlet. Os extratos obtidos foram separados em frações saturadas e aromáticas por cromatografia líquida em colunas de vidro embaladas a seco com 1,4 g de sílica gel. Hidrocarbonetos saturados foram eluídos com n-hexano (4 mL) e hidrocarbonetos aromáticos com n-hexano: DCM (1:1 v/v, 4 mL).

### 3.3 Ensaios em branco

A fim de avaliar os contaminantes do laboratório, foram analisados brancos cumulativos do sistema de laboratório.

Cada etapa do ensaio (extração, secagem da matéria orgânica e fracionamento) foi feita sem extrato de rocha, portanto, sem biomarcadores a serem extraídos. Foram usados sete conjuntos de vidrarias. As alíquotas foram extraídas e injetadas no CG-MS. Dessa forma, as interpretações dos cromatogramas puderam ser feitas e possíveis fontes de contaminação puderam ser avaliadas. Posteriormente, já tendo a quantificação dos possíveis biomarcadores contidos nos conjuntos de amostras, o mesmo conjunto de vidrarias foi utilizado para a extração dos extratos de rocha. Ou seja, o conjunto de vidraria 1 foi usado para a amostra de profundidade 7,25 m; o conjunto 2 para a amostra de 26 m; o conjunto 3 para a amostra de 52,4 m e assim por diante.

Assim, foi possível fazer uma comparação entre os cromatogramas obtidos a partir do procedimento de extração sem amostra com aqueles obtidos com o extrato de rocha, sendo possível identificar compostos contaminantes, que apareceriam no procedimento sem extrato e, posteriormente, com o extrato da rocha, garantindo que aqueles resultados eram sinais da rocha e não provenientes do laboratório.

### 3.4 Espectrometria de massa por cromatografia gasosa (GC/MS)

As análises de cromatografia gasosa-espectrometria de massa (GC-MS) foram realizadas em um Agilent 6890 GC acoplado a um MS de setor duplo Micromass Autospec Premier. O GC foi equipado com uma coluna capilar DB-5MS (60 m × 0,25 mm de diâmetro interno, espessura de filme de 0,25 µm) e utilizou hélio (fluxo constante de 1 ml / min) como gás de transporte.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Distribuição dos n-alcenos: evidências de bactérias e algas

A distribuição dos n-alcenos foi interpretada a partir dos cromatogramas de íon m/z 85 (Figura 02).

Os n-alcenos são derivados de componentes de membrana celular, como fosfolipídios e esfingolipídios, produzidos por bactérias e algas; biopolímeros polimetilênicos, biossintetizados por microalgas (Tegelaar *et al.*, 1989) e ceras introduzidas por detritos de plantas vasculares (Hedberg, 1968).

As distribuições de n-alcenos podem variar dependendo da fonte biológica. Por exemplo, concentrações elevadas de n-alcenos com números ímpares de carbono entre C15 e C19, com máximo em C17, apontam para a presença de cianobactéria (Fowler, 1992; Hoffmann *et al.*, 1987). Bactérias e algas tendem a produzir n-alcenos de baixo peso molecular (<n-C25), enquanto as plantas superiores sintetizam preferencialmente n-alcenos de alto peso molecular (> n-C25; Tissot & Welte, 1984).

Os vegetais superiores se desenvolveram no Siluriano (Eglinton e Hamilton, 1967), portanto em amostras pré-cambrianas não é possível que n-alcenos de alto peso molecular singenéticos sejam derivados de plantas terrestres. Em amostras pré-cambrianas, acredita-se que n-alcenos com número de carbono <25 sejam derivados de fontes bacterianas e/ou algais, enquanto n-alcenos com número de carbono > 25 podem ser derivados de esporos de fungos, bactérias sulfato redutoras e/ou ou algumas algas (Wang e Simoneit, 1995).

Em rochas sedimentares com pouca ou nenhuma contribuição de matéria orgânica terrígena, os algaenanos são provavelmente as fontes mais importantes de hidrocarbonetos alifáticos de alto peso molecular (Peters *et al.*, 2005).

Algaenanos são macromoléculas insolúveis, não hidrolisáveis e altamente alifáticas que servem como um componente estrutural na parede celular de várias algas verdes marinhas (Derenne *et al.*, 1992; Gelin *et al.*, 1996) e de água doce (Blokker *et al.*, 1998)

(clorófitas) e eustigmatófitos marinhos (Geli *et al.*, 1996, 1999).

Uma característica notável de todas as amostras da Formação Salitre são as baixas concentrações de n-alcenos com baixo peso molecular menores que C15, que são consistentes com um condensado que sofreu perda por evaporação de componentes mais leves.

Distribuições bimodais de n-alcenos (máximas entre C15-C18 e C22-C31) são encontradas nas amostras 7,25 m, 26 m e 96,5 m. Um padrão unimodal com o máximo em torno de C22-C29 é encontrado na amostra 52,4 m, enquanto na amostra 135,05 m também é observada uma distribuição unimodal centrada nos compostos C22-C27.

Essas distribuições refletem contribuições tanto de n-alcenos de baixo peso molecular (<C25), sintetizados preferencialmente por algas e bactérias (Tissot & Welte, 1984), quanto de n-alcenos de alto peso molecular (>25), derivados possivelmente de algaenanos (Peters *et al.*, 2005), sugerindo contribuição de algas verdes.

Já nas amostras 112,8 m e 157,3 m, diferente das anteriores, verifica-se uma distribuição unimodal com máximo em torno de C22-C25, ou seja, centrada em n-alcenos de baixo peso molecular (<C25), derivadas de fontes bacterianas e/ou algais.

A abundância relativa dos n-alcenos de alto peso molecular, de modo geral, diminui nos intervalos de maior profundidade do furo de sondagem.

Se considerarmos que algas são as precursoras dos n-alcenos de alto peso molecular, podemos associar que as amostras microbiais tiveram maior contribuição dessa biota algal, já que essas amostras exibiram maior conteúdo de n-alcenos de alto peso molecular.

## **4.2 Distribuição dos isoprenoides Pristano e Fitano: evidências para organismos fototróficos e condições redox**

Todas as amostras contêm o isoprenoide regular fitano (F). Já o pristano (P) é encontrado apenas nas amostras 7,25 m, 26 m e 135,05 m (Figura 02).

Embora os precursores de pristano e fitano possam ser produzidos por vários organismos diferentes, sua fonte mais comum são os organismos fototróficos (Powell e McKirdy, 1973).

O pristano e o fitano são geralmente considerados como um produto da degradação do fitol derivado da (bactéria) clorofila e suas proporções são comumente usadas para interpretar as condições redox de antigos ambientes deposicionais. Condições anóxicas durante a diagênese promovem a conversão de fitol em fitano, enquanto as condições óxicas promovem a conversão em pristano (Peters *et al.*, 2005). Assim, as razões  $P / F < 1$  são comumente explicadas pela exposição diagenética precoce da clorofila a condições redutoras, enquanto as razões  $> 1$  sugerem tempos de exposição ao oxigênio elevados (Waples e Machihara, 1991).

Os valores da razão P/F para a Formação Salitre não puderam ser calculados para

todas as amostras, já que na maioria delas o pristano não foi encontrado. Os valores que puderam ser calculados são de 0,38, 0,21 e 0,38, para as amostras MC-2-BA 7,25 m, 26 m e 135,05 m, respectivamente. Esses valores são menores que 1,0, indicando que o fitan é mais abundante do que o pristano, sugerindo condições redutoras.

### **4.3 Distribuição de isoprenoides i-25 e i-30 (esqualano): evidências para archaea halofílica e indicadores de salinidade**

Em todas as amostras da Fazenda Arrecife foram encontrados isoprenoides pentametilicosano (i-C25) e esqualano (i-C30), sendo o i-30 ausente nas amostras 112,8 e 157,3 m (Figura 02).

A presença dos isoprenoides i-25 e i-30 é interpretada para refletir a entrada de archaeas halofílicas (Fu et al., 1986; Ten Haven et al., 1986), particularmente abundantes em ambientes hipersalinos (Mello e Maxwell, 1990; Mello et al., 1993; Mello et al., 1995; Schwark et al., 1998).

De modo geral, é observada uma diminuição da abundância relativa desses isoprenoides com o aumento da profundidade, estando até mesmo ausente o i-30 nas profundidades 112,8 m e 157,3 m, refletindo intervalos de menor salinidade no momento da deposição.

### **4.4 Distribuição dos terpanos**

A identificação dos terpanos tri, tetra e pentacíclicos foi realizada através da análise dos cromatogramas de massas m/z 191 (Figura 02).

Os terpanos tricíclicos são derivados de poliprenóis de precursores bacterianos, considerados importantes constituintes da membrana de células de organismos procariontes (Ourisson *et al.*, 1982).

Os hopanos são originários de uma ampla gama de organismos procarióticos. Os seus precursores são bacterioanepanolóis (BHPs), compostos contidos nas membranas das células lipídicas de diversas bactérias (por exemplo, Ourisson *et al.*, 1984; Talbot e Farrimond, 2007).

Para os terpanos tricíclicos, o C23 foi o composto mais abundante em todas as amostras. Vários tipos de ambientes deposicionais têm mostrado que C23 é frequentemente dominante em óleos de origem marinha, enquanto os membros C19 e C20 são mais abundantes em óleos de origem terrestre (Peters et. al., 2005).

Os hopanos regulares C29 e C30 são os mais abundantes em todas as amostras.

Nas amostras 7,25 m, 26 m, 52,4 m e 96,5 m ocorre predomínio do C30 em relação ao C29. Na amostra 112,8 m há uma ligeira predominância do C29 em relação ao C30. A amostra 135,05 m não exibe uma predominância clara de C30 em relação a C29. Já a amostra 157,3 m exibe um discreto predomínio do C30 sobre o C29.

A principal fonte de hopanos sedimentares é de organismos procarióticos (Ourisson *et al.*, 1979). Além disso, hopanos específicos e razões de hopano podem ser usados para

fazer inferências sobre o ambiente deposicional, especialmente em relação às condições redox presentes durante a deposição e diagênese inicial da matéria orgânica.

Uma gama completa de C31-C35 de hopanos estendidos, que diminuem progressivamente com o aumento do número de carbono, foram identificados em todas as amostras, sendo o C31 o mais abundante. Também há predomínio dos epímeros S em relação aos epímeros R.

Os hopanos estendidos C31-C35 também podem fornecer informações importantes sobre as condições redox na configuração deposicional. Bacteriohopanetetrol, o precursor dos hopanos estendidos C31-C35 são sintetizados por bactérias aeróbias (Ourisson *et al.*, 1979), o que sugere condições óxicas.

A observação dos homohopanos indica predomínio dos picos C31 e C32, sugerindo paleoambiente deposicional sub-óxico a óxico (Nazir, 2013).

Os homohopanos C34 e C35 são tipicamente preservados apenas sob condições altamente redutoras (Peters e Moldowan, 1991).

A principal diferença observada na distribuição dos terpanos nas amostras analisadas está relacionada aos hopanos estendidos e aos tricíclicos.

Nas amostras mais rasas (7,25 m, 26 m, 52,4 m e 96,5 m), há o predomínio dos hopanos estendidos em relação aos terpanos tricíclicos. Com o aumento da profundidade, a concentração dos terpanos tricíclicos aumenta consideravelmente em relação aos hopanos estendidos, como verificado nas amostras 12,8 m, 135,05 m e 157,3m.

Essas distribuições de terpanos podem indicar uma mudança na fonte biológico e/ou no ambiente deposicional, documentando a evolução geoquímica do ambiente deposicional.

De Grande *et al.* (1993) relataram terpanos tricíclicos proeminentes em ambientes lacustres salinos e marinhos carbonáticos, indicando que o precursor viveu em condições de salinidade moderada.

Em termos de condições de deposição da fonte, Dahl *et al.* (1993) sugerem que os precursores dos hopanos predominam durante a época de maior anoxia e / ou salinidade, enquanto os precursores de terpanos tricíclicos estão em maior abundância relativa em condições mais óxicas / menos salinas.

É possível correlacionar a abundância dos terpanos tricíclicos à distribuição dos isoprenoides i-25 e i-30, indicativos de hipersalinidade. Nas amostras mais profundas, esses compostos também são verificados em menor abundância e / ou ausentes.

Considerando que os compostos i-25 e i-30 são usados como indicadores de deposição em condições hipersalinas, as amostras mais profundas parecem refletir condições de salinidade mais baixa, sugerindo uma resposta devido a alteração das condições de salinidade no momento da deposição.

#### 4.5 Distribuição dos esteranos: evidências de algas vermelhas e verdes

Através da análise dos cromatogramas de massas  $m/z$  217 foi possível a identificação de esteranos de C27 a C29 (Figura 3).

Todas as amostras apresentaram o predomínio do C27 com configuração  $\alpha\beta$ .

A aplicação da distribuição de esteranos regulares C27, C28 e C29 na determinação da fonte biológica de matéria orgânica é baseada na observação de que esteranos são derivados de esteróis encontrados na maioria das plantas superiores e algas, mas são raros ou ausentes em organismos procarióticos (Waples & Machiara, 1991).

A predominância de C29 é um indicativo de uma forte contribuição de matéria orgânica de fontes terrestres. Já o predomínio do esteroano C27 indicaria matéria orgânica derivada de plâncton marinho. O esteroano C28 é geralmente encontrado em menor abundância e indica forte contribuição de algas lacustres (Waples & Machihara, 1991).

No entanto, esteróis C29, precursores do esteroano C29, podem ser produzidos por algas verdes (Volkman *et al.*, 1994), sendo a provável fonte desse composto no pré-cambriano.

Distribuições dominadas por esteranos C29 foram observadas em amostras geológicas Neoproterozóicas em todo o mundo (Fowler e Douglas, 1987; Summons e Powell, 1992; Peters *et al.*, 1995) e são atribuídas a algas verdes (Grantham e Wakefield 1988), que devem ter sido importantes produtores primários na época.

Em contraste, o precursor de esteroano C27 é produzido predominantemente por algas vermelhas (Volkman, 1986).

Como em todas as amostras estudadas ocorre predomínio do C27, pode-se propor que houve uma proliferação de algas vermelhas no momento da deposição da rocha-fonte, refletida na abundância dominante de esteranos C27, com uma contribuição secundária de algas verdes, refletida pelo C29

#### 4.6 Parâmetro Esteroano/Hopano: organismos procarióticos versus eucarióticos

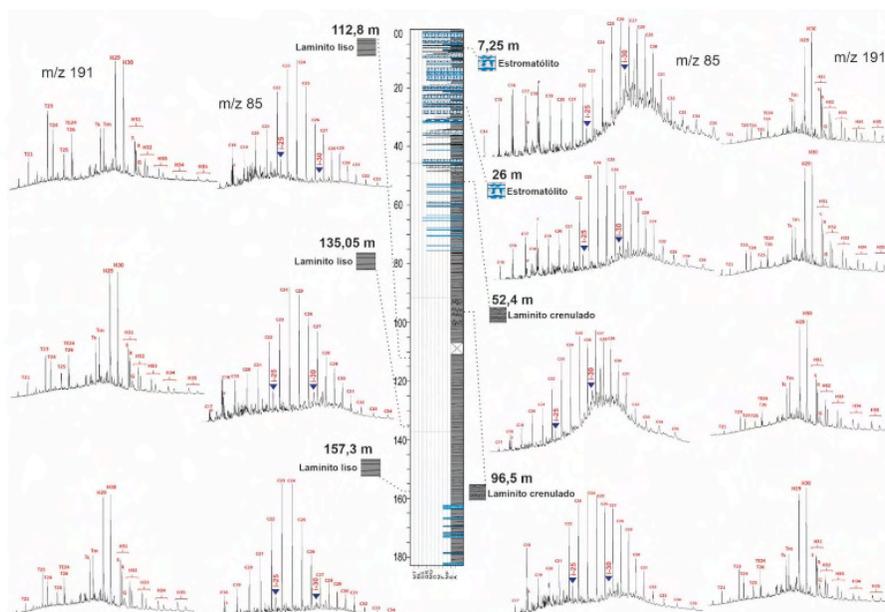
A razão esteroano/hopano, que é usada para indicar a razão de entrada procariótica versus eucariótica para um sistema, pode ser usada para avaliar ainda mais a fonte de matéria orgânica (Peters *et al.*, 2005).

Em geral, altas concentrações de esteranos e esteranos/hopanos altos ( $\geq 1$ ) indicam predomínio de entrada eucariótica (por exemplo, Moldowan *et al.*, 1985). Por outro lado, esteranos baixos e esteranos/hopanos baixos são mais indicativos de contribuição procariótica (por exemplo, Tissot e Welte, 1984).

Uma avaliação qualitativa das entradas relativas de organismos eucarióticos e procarióticos, representados pela proporção de esteranos/hopanos  $< 1$  (Tabela 2), mostra que, embora os eucariotos estivessem presentes, os procariotos eram dominantes.

	<b>Amostras</b>	<b>Esterano/Hopano</b>
<b>Furo MC-02-BA</b>	7,25 m	0,36
	26 m	0,33
	52,4 m	0,30
	96,6 m	0,23
	112,8 m	0,22
	135,05 m	0,28
	157,3 m	0,30

Tabela 2: Razão esterano/hopano para as amostras analisadas.



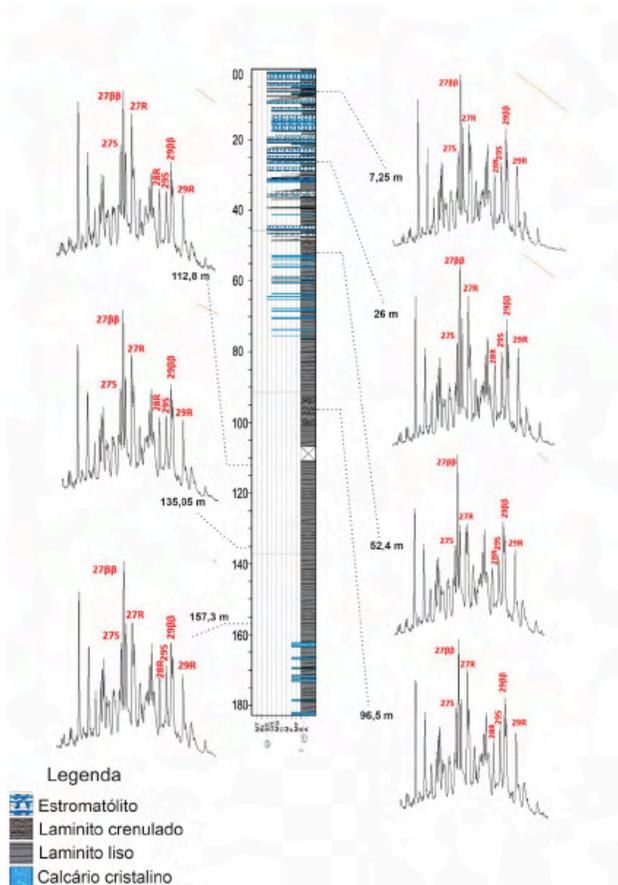


Figura 3: Cromatogramas de íon  $m/z$  217 para as amostras do furo MC-2-BA.

#### 4.7 Deposição das fácies microbiais e laminito liso na Fazenda Arrecife

As mudanças encontradas na distribuição dos biomarcadores sugerem uma combinação de processos físicos/químicos e biológicos, refletidos pela mudança faciológica.

Uma série de parâmetros moleculares diferiram entre as fácies microbiais e laminito liso, apontando claramente para diferenças ambientais e nas comunidades microbianas responsáveis pela produção de matéria orgânica.

Em primeiro lugar, a distribuição dos *n*-alcanos evidencia diferenças entre as fácies.

As fácies microbiais (estromatólito e laminito crenulado) contêm maior concentração relativa dos *n*-alcanos de alto peso molecular, derivados de possíveis algas eucarióticas, enquanto nas fácies laminito liso esses compostos são verificados em menor abundância e/ou ausentes, com predomínio de *n*-alcanos de baixo peso molecular, sintetizados principalmente por bactérias.

Em segundo lugar, a distribuição dos isoprenoides *i*-25 e *i*-30, marcadores associados

à hipersalinidade, refletem um intervalo de menor salinidade no momento da deposição das fácies laminito liso.

Em terceiro lugar, é observada uma notável diferença na distribuição dos terpanos tricíclicos e homohopanos.

As fácies microbiais apresentam menor abundância relativa de terpanos tricíclicos e maior abundância dos homohopanos quando comparadas às fácies laminito liso, que, por sua vez, exibe maior abundância relativa de terpanos tricíclicos, associada à uma diminuição dos homohopanos. Diversos autores mostraram que essa relação pode ser controlada pela salinidade: em momentos de maior salinidade, há o predomínio dos homohopanos em relação aos terpanos tricíclicos.

Esses resultados são coerentes com a distribuição dos isoprenoides i-25 e i-30, que também refletiram um momento de menor salinidade na deposição d laminito liso.

Considerando que, se o aumento da abundância dos terpanos tricíclicos associado à diminuição dos homohopanos e dos isoprenoides i-25 e i-30, são devidos a mudanças na salinidade, essas condições sugerem uma área de salinidade relativamente mais baixa no momento da deposição das amostras mais profundas, refletidas pe as fácies laminito liso.

Essa condição deposicional parece estar associada a um controle eustático. A deposição das fácies laminito liso pode ter sido governada por condições climáticas possivelmente associadas à deglaciação, que permitiu a implantação de um corpo d'água perene, o qual se desenvolveu a rampa carbonática.

Aliada a uma progressiva salinização da bacia, claramente evidenciada pela distribuição dos terpanos tricíclicos e isoprenoides i-25 e i-30, provavelmente devido a um confinamento da bacia de deposição e aumento nas condições de evaporação, produz o palco ideal para o desenvolvimento dos depósitos microbiais.

Assim, a expansão e ocupação da área deposicional pelos estromatólitos só foi possível pelas condições ótimas que estavam sendo progressivamente implantadas na bacia. Dessa forma, o registro dessa fácies deposicional irá ocorrer de maneira restrita no registro sedimentar, como observada apenas na parte superior do furo MC-2-BA.

Essas mudanças ambientais, principalmente associada à salinidade, refletem uma consequente mudança biológica, devido à adaptação dos organismos ao ambiente. A principal diferença da fonte biológica é refletida pela maior abundância de possíveis algas e archaeas nas fácies microbiais.

## 5 | CONCLUSÕES

As razões de isomerização dos homohopanos e esteranos indicam baixa maturidade térmica da matéria orgânica de todas as amostras analisadas, consistentes com a estabilidade estrutural da bacia geológica e baixo grau metamórfico da Formação Salitre, sugerindo que os biomarcadores encontrados são provavelmente singenéticos.

Distribuições e proporções de biomarcadores calculadas para a Formação Salitre mostram evidências de estratificação redox. Isso é baseado na justaposição de condições anóxicas e redutoras, inferidas pela razão pristano/fitano, combinadas com condições óxicas, inferidas a partir da presença de homohopanos C31-C35, com grande predomínio dos compostos C31 e C32.

A presença de isoprenoides i-25 e i-30 apoiam a suposição de um ambiente salino a hipersalino para as rochas da Formação Salitre.

Tomadas em conjunto, as distribuições de biomarcadores presentes nas amostras da Formação Salitre retratam um ambiente que apoiava uma comunidade microbiana diversa incluindo bactérias fototróficas, archaeas halofílicas algas vermelhas e verdes.

Isso é corroborado por outros estudos de biomarcadores em amostras Pré-Cambrianas brasileiras (Olcott et al., 2005; Miller, 2012; Little et al., 2013, Webb, 2013; Sousa Júnior et. al., 2017). Esses autores encontraram o mesmo consórcio de micro-organismos identificados em nosso estudo

A presença de esteranos nas amostras da Formação Salitre sugere que os eucariotos contribuíram para o reservatório orgânico preservado nessas rochas. No entanto, as relações esterano / hopano em todas as amostras são baixas, indicando que, embora os eucariotos estivessem presentes, uma comunidade microbiana dominada por bactérias era dominante.

De forma geral, os resultados biomarcadores lipídicos registrados neste estudo são consistentes com o que foi relatado por Little *et. al.*, (2013), estudando o Grupo Bambuí, cronocorrelato ao Grupo Una, o qual está inserida a Formação Salitre.

Diferenças nas distribuições dos biomarcadores sugerem que as fácies laminito liso foram depositadas em um momento de menor salinidade na bacia, refletid principalmente pela abundância dos terpanos tricíclicos, associados à diminuição dos homohopanos e isoprenoides i-25 e i-30. Em direção ao topo, onde são encontradas as fácies laminito crenulado e, mais próximas da superfície, fácies estromatolíticas, foram verificados diminuição na abundância dos terpanos tricíclicos, associados ao aumento dos homohopanos e dos isoprenoides i-25 e i-30, sugerindo um ciclo de raseamento na bacia, com maior evaporação, resultando em águas de maior salinidade.

Esses resultados são coerentes com a distribuição dos n-alcenos, que também demonstra diferença na distribuição no mesmo intervalo de profundidade, refletind possíveis mudanças ambientais, como a salinidade, indicada pela distribuição dos terpanos, homohopanos e isoprenoides, e, conseqüentemente, da comunidade biológica, que se adapta as condições ambientais, refletido por mudança fa iológica.

Os resultados obtidos nas rochas carbonáticas da Formação Salitre demonstram a capacidade de recuperar biomarcadores em rochas tão antigas e são uma evidência direta de que esses organismos eram de fato um dominante componente dos microbialitos antigos.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, FFM de et al. Províncias estruturais brasileiras. **Simpósio de Geologia do Nordeste**, v. 8, n. 1977, p. 363-391, 1977.
- AWRAMIK, Stanley M.; GREY, Kathleen. Stromatolites: biogenicity, biosignatures, and bioconfusion. In: **Astrobiology and Planetary Missions**. International Society for Optics and Photonics, 2005. p. 59060P.
- BIZZI, Luiz Augusto et al. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. 2003.
- BLOKKER, Peter et al. Chemical structure of algaenans from the fresh water algae *Tetraedron minimum*, *Scenedesmus communis* and *Pediastrum boryanum*. **Organic Geochemistry**, v. 29, n. 5-7, p. 1453-1468, 1998. Brito Neves, B. B. D., & Pedreira, A. J. (2008). Diamictitos e Cap Dolomites Sturtianos Sobre o Grupo Jacobina-Araras, Norte de Campo Formoso, Bahia.
- BROCKS, Jochen J. et al. A reconstruction of Archean biological diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-year-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley Basin, Western Australia. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 67, n. 22, p. 4321-4335, 2003.
- DAHL, Jeremy; MOLDOWAN, J. Michael; SUNDARARAMAN, Padmanabhan. Relationship of biomarker distribution to depositional environment: Phosphoria Formation, Montana, USA. **Organic Geochemistry**, v. 20, n. 7, p. 1001-1017, 1993.
- DE GRANDE, S. M. B.; NETO, FR Aquino; MELLO, M. R. Extended tricyclic terpanes in sediments and petroleum. **Organic geochemistry**, v. 20, n. 7, p. 1039-1047, 1993.
- DERENNE, S. et al. Non-hydrolysable macromolecular constituents from outer walls of *Chlorella fusca* and *Nanochlorum eucaryotum*. **Phytochemistry**, v. 31, n. 6, p. 1923-1929, 1992.
- EGLINTON, Geoffrey; HAMILTON, Richard J. Leaf epicuticular waxes. **Science**, v. 156, n. 3780, p. 1322-1335, 1967.
- FOWLER, M. G.; DOUGLAS, ANDA G. Saturated hydrocarbon biomarkers in oils of Late Precambrian age from Eastern Siberia. **Organic Geochemistry**, v. 11, n. 3, p. 201-213, 1987.
- FU, Jiamo. Peculiarities of Salt Lake sediments as potential source rocks in China. **Org. Geochem.**, v. 10, p. 119-126, 1986.
- GELIN, Fran90is et al. Novel, resistant microalgal polyethers: an important sink of organic carbon in the marine environment?. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 60, n. 7, p. 1275-1280, 1996.
- GELIN, F. et al. Distribution of aliphatic, nonhydrolyzable biopolymers in marine microalgae. **Organic Geochemistry**, v. 30, n. 2-3, p. 147-159, 1999.
- GRANTHAM, P. J.; WAKEFIELD, L. L. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time. **Organic geochemistry**, v. 12, n. 1, p. 61-73, 1988.
- GROTZINGER, John P.; KNOLL, Andrew H. Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks?. **Annual review of earth and planetary sciences**, v. 27, n. 1, p. 313-358, 1999.
- GUIMARÃES, José Torres. **A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação**. 1996. Tese de Doutorado.

HEDBERG, Hollis D. Significance of high-wax oils with respect to genesis of petroleum. **AAPG Bulletin**, v. 52, n. 5, p. 736-750, 1968.

LIMA, Rebeca Seabra de. **Imageamento e modelagem digital com GPR em microbialitos da Fazenda Arrecife, Chapada Diamantina (BA), NE do Brasil**. 2017. Dissertação de Mestrado. Brasil.

LITTLE, Jess; MILLER, Kristen; KAUFMAN, Alan J. Biomarker analysis of carbon rich shales in the Neoproterozoic Bambuí Group, Brazil. 2013.

MELLO, M. R.; MAXWELL, J. R. Organic geochemical and biological marker characterization of source rocks and oils derived from lacustrine environments in the Brazilian continental margin: Chapter 5. 1990.

MELLO, Marcio R. et al. Geochemical and Micropaleontological Characterization of Lacustrine and Marine Hypersaline Environments from Brazilian Sedimentary Basins: Chapter 3. 1993.

MELLO, Márcio Rocha; TELNAES, N.; MAXWELL, J. R. The hydrocarbon source potential in the Brazilian marginal basins: a geochemical and paleoenvironmental assessment. 1995.

MILLER, Kristen Elizabeth. **An Integrated Isotopic and Biomarker Analysis of the Glaciogenic Vazante Group, Brazil**. 2012. Tese de Doutorado.

MISI, A. **As seqüências Bambuí no Estado da Bahia e as mineralizações de chumbo-zinco associadas**. 1976. Tese de Doutorado. Tese Livre Docência (Professor Thesis), Universidade Federal Da Bahia, Salvador.

MISI, A. A sedimentação carbonática do Proterozóico Superior no cráton do São Francisco: evolução diagenética e estratigrafia isotópica. In: **II Symposium on the São Francisco Craton, Extended Abstracts, Salvador, Brazil**. 1993. p. 192-193.

MOLDOWAN, J. Michael; ALBRECHT, Pierre; PHILIP, R. Paul. Biological markers in sediments and petroleum. 1992.

NAZIR, Arif. **Biomarkers and pyrolysis parameters to investigate hydrocarbon generating potential of cretaceous sequences**. 2013. Tese de Doutorado. UNIVERSITY OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY LAHORE–PAKISTAN.

OLCOTT, Alison N. et al. Biomarker evidence for photosynthesis during Neoproterozoic glaciation. **Science**, v. 310, n. 5747, p. 471-474, 2005.

OURISSON, Guy; ALBRECHT, Pierre; ROHMER, Michel. Predictive microbial biochemistry—from molecular fossils to procaryotic membranes. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 7, n. 7, p. 236-239, 1982.

OURISSON, Guy; ALBRECHT, Pierre; ROHMER, Michel. The microbial origin of fossil fuels. **Scientific American**, v. 251, n. 2, p. 44-51, 1984.

PEDREIRA, A. J. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina Centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica. **São Paulo**, 1994.

PETERS, K. E. et al. Recognition of an Infracambrian source rock based on biomarkers in the Baghewala-1 oil, India. **AAPG bulletin**, v. 79, n. 10, p. 1481-1493, 1995.

PETERS, K. E.; MOLDOWAN, J. M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum. **Organic geochemistry**, v. 17, n. 1, p. 47-61, 1991.

PETERS, Kenneth Eric et al. **The biomarker guide**. Cambridge university press, 2005.

- POWELL, T. G.; MCKIRDY, D. M. Relationship between ratio of pristane to phytane, crude oil composition and geological environment in Australia. **Nature Physical Science**, v. 243, n. 124, p. 37-39, 1973.
- SCHINTEIE, Richard; BROCKS, J. J. Paleoeology of Neoproterozoic hypersaline environments: Biomarker evidence for haloarchaea, methanogens, and cyanobacteria. **Geobiology**, v. 15, n. 5, p. 641-663, 2017.
- SCHWARK, L.; VLIEX, M.; SCHAEFFER, P. Geochemical characterization of Malm Zeta laminated carbonates from the Franconian Alb, SW-Germany (II). **Organic Geochemistry**, v. 29, n. 8, p. 1921-1952, 1998. Seifert, W. K., & Moldowan, J. M. (1980). The effect of thermal stress on source-rock quality as measured by hopane stereochemistry. *Physics and Chemistry of the Earth*, 12, 229-237.
- SEIFERT, WOLFGANG K.; MOLDOWAN, J. MICHAEL. Use of biological markers in petroleum exploration. **Methods in geochemistry and geophysics**, v. 24, p. 261-290, 1986.
- SOUSA JUNIOR, Gustavo Rodrigues de et al. **Caracterização Geoquímica de Betumes das Capas Carbonáticas do Craton Amazônico, Brasil**. 2017.
- SUMMONS, Roger E.; POWELL, Trevor G. Hydrocarbon composition of the Late Proterozoic oils of the Siberian Platform: Implications for the depositional environment of source rocks. In: **Early organic evolution**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1992. p. 296-307.
- TALBOT, Helen M.; FARRIMOND, Paul. Bacterial populations recorded in diverse sedimentary biohopanoid distributions. **Organic Geochemistry**, v. 38, n. 8, p. 1212-1225, 2007.
- TEGELAAR, E. W. et al. Possible origin of n-alkanes in high-wax crude oils. **Nature**, v. 342, n. 6249, p. 529-531, 1989.
- TEN HAVEN, H. L. et al. Application of biological markers in the recognition of palaeohypersaline environments. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 40, n. 1, p. 123-130, 1988.
- THIEL, Volker et al. Biomarker studies on microbial carbonates: extractable lipids of a calcifying cyanobacterial mat (Everglades, USA). **Facies**, v. 36, n. 1, p. 163-172, 1997.
- WELTE, D. H.; TISSOT, P. B. **Petroleum formation and occurrence**. Springer-verlag, 1984.
- UHLEIN, Alexandre et al. Glaciação neoproterozóica sobre o cráton do São Francisco e faixas dobradas adjacentes. **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, Beca, São Paulo**, p. 539-553, 2004.
- VOLKMAN, John K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. **Organic geochemistry**, v. 9, n. 2, p. 83-99, 1986.
- VOLKMAN, John K.; BARRETT, Stephanie M.; DUNSTAN, Graeme A. C25 and C30 highly branched isoprenoid alkenes in laboratory cultures of two marine diatoms. **Organic Geochemistry**, v. 21, n. 3-4, p. 407-414, 1994.
- WANG, T.-G.; SIMONEIT, Bernd RT. Tricyclic terpanes in Precambrian bituminous sandstone from the eastern Yanshan region, North China. **Chemical Geology**, v. 120, n. 1-2, p. 155-170, 1995.
- WAPLES, Douglas Wendle.; MACHIARA T. Biomarkers for geologists-a practical guide to the application of steranes and triterpanes in petroleum geology. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Methods in Exploration, n.9, Oklahoma, Tulsa**, 91 p. 1991.
- WEBB, Jamie. Biomarker analysis of organic carbon rich carbonates and shales of the Meso-Neoproterozoic Sete Lagoas, Paracatú and Serra do Garrote Formations, São Francisco Basin, Brazil and the early Cambrian Sirius Passet Lagerstätte, Greenland. Dissertação de Mestrado.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acidez total 93, 95, 96, 97, 100

Ácidos naftênicos 93, 94, 95, 96, 107, 116

Alquildibenzotiofenos 145, 150

Alquilfenantrenos 145, 148, 149, 150

Análise SARA 161, 166

Asfalteno 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 163, 166, 168

### B

Bacia de São Luís 1, 2, 6, 11, 12

Bacia do Paraná 4, 5, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 26, 42, 46, 47, 48, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 72, 73, 74, 75, 122, 123, 125, 130, 198, 199

Biodegradação 3, 7, 15, 93, 94, 96, 97, 99, 101, 103, 104, 107, 108, 112, 113, 115, 119, 133, 142, 150, 152, 162, 164, 167, 168, 169, 177, 183, 204, 206, 209

Biomarcadores 2, 3, 4, 5, 1, 2, 3, 14, 15, 16, 19, 21, 23, 28, 38, 49, 59, 60, 61, 66, 73, 76, 77, 79, 80, 87, 88, 89, 95, 108, 111, 115, 118, 122, 126, 127, 132, 133, 134, 135, 137, 139, 141, 142, 143, 144, 146, 148, 152, 159, 160, 162, 193, 197, 199, 200, 201, 203, 204, 206, 209

Biomarcadores aromáticos 159

Biomarcadores saturados 28, 49, 59, 61, 76

### C

Camadas batateiras 27, 28, 29, 30, 38

Carotenoides aromáticos 4, 27, 28, 38, 39, 145, 153, 155

Contaminação ambiental 179

Cretáceo 6, 1, 6, 12, 40, 64, 117, 120, 122, 145, 195

Cromatografia líquida 6, 48, 66, 80, 160, 161, 162, 163, 166, 171

### D

DFT 132, 135, 136, 142

Dibenzotiofenos 111, 145, 150, 151

### E

Extração em fase sólida 5, 93, 96, 98

### F

Folhelho rico em carbono orgânico 193

Folhelhos betuminosos 17, 36, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 123, 198  
Formação codó 6, 1, 2, 3, 6, 11, 12, 40, 145, 146, 147, 149, 152, 153, 154, 155, 156  
Formação Irati 4, 14, 15, 17, 18, 24, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 59, 60, 62, 63, 64, 73, 74, 75, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 198, 199  
Formação serra alta 4, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 26, 124

## **G**

Geocromatografia 110  
Geoquímica orgânica 3, 1, 14, 20, 27, 39, 42, 55, 59, 60, 66, 74, 76, 79, 122, 126, 130, 148, 160, 179, 189, 200, 203, 209

## **H**

Hidrocarbonetos alifáticos 81, 132, 134, 179, 180, 181, 182, 186, 188  
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos 179, 180, 181, 187  
Hopenos 27, 38

## **I**

Interpretações paleoambientais 193, 199, 200

## **M**

Matéria orgânica 3, 4, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 46, 47, 48, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 77, 79, 80, 81, 84, 85, 87, 88, 104, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 122, 124, 126, 128, 129, 130, 133, 134, 145, 146, 147, 148, 150, 162, 164, 180, 182, 183, 184, 185, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 206  
Migração secundária 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 119  
MTTC 42, 43, 44, 45, 49, 50, 51, 53

## **P**

Paleoambiente deposicional 14, 23, 27, 28, 36, 42, 43, 45, 46, 52, 53, 55, 104, 145, 147, 150, 151, 155, 209  
Paleosalinidade 42, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 55  
Permiano inferior 17, 24, 47, 62, 122  
Petróleo 3, 5, 12, 15, 16, 18, 23, 26, 41, 42, 43, 55, 56, 59, 75, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 104, 107, 109, 110, 111, 112, 120, 125, 130, 132, 133, 142, 143, 144, 147, 151, 154, 157, 160, 161, 162, 163, 165, 168, 176, 177, 184, 188, 194, 195, 196, 198, 199, 200, 203, 204, 205, 209  
Planejamento fatorial 6, 160, 161, 163, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 178

## **Q**

Química computacional 132

## **R**

Rio Parnaíba 6, 179, 180, 181, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Rochas geradoras 13, 22, 28, 46, 57, 59, 61, 122, 147, 150, 151, 193, 195, 199, 200, 202, 203, 204, 209

## **S**

SMFI 110, 111, 113, 114, 115

Fósseis Moleculares e Aplicações em

# GEOQUÍMICA ORGÂNICA

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 

 **Atena**  
Editora

Ano 2021

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
**GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA**

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 

 **Atena**  
Editora

Ano 2021