



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Pedro Alvim Carneiro Peixoto Neves

**CARACTERIZAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE FORAMINÍFEROS NO LITORAL DO
RIO GRANDE DO NORTE, REGIÃO DE RIO DO FOGO, COM ÊNFASE NA
PRESERVAÇÃO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Rio de Janeiro
2024**

PEDRO ALVIM CARNEIRO PEIXOTO NEVES

CARACTERIZAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE FORAMINÍFEROS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE, REGIÃO DE RIO DO FOGO, COM ÊNFASE NA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Aristóteles de Moraes Rios Netto
(Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ)

Profa. Dra. Claudia Gutterres Vilela
(MicroCentro, IGEO/UFRJ)

Mc. Kimmolly Ferrari Ferreira
(MicroCentro, IGEO/UFRJ)

CIP - Catalogação na Publicação

N372c Neves, Pedro Alvim Carneiro Peixoto
Caracterização da assembleia de foraminíferos no
litoral do Rio Grande Norte, região de Rio do Fogo,
com ênfase na preservação ambiental / Pedro Alvim
Carneiro Peixoto Neves. -- Rio de Janeiro, 2024.
71 f.

Orientador: Aristóteles de Moraes Rios Netto .
Coorientadora: Claudia Guterres Vilela .
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Geociências, Bacharel em Geologia, 2024.

1. Foraminíferos. 2. Tafonomia. 3. Geoconservação.
I. Netto , Aristóteles de Moraes Rios, orient. II.
Vilela , Claudia Guterres , coorient. III. Título.

PEDRO ALVIM CARNEIRO PEIXOTO NEVES

CARACTERIZAÇÃO DA ASSEMBLEIA DE FORAMINÍFEROS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE, REGIÃO DE RIO DO FOGO, COM ÊNFASE NA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientador(es):

Prof. Dr. Aristóteles de Moraes Rios Netto
(Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ)

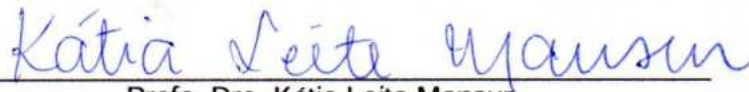
Profa. Dra. Cláudia Guterres Vilela
(MicroCentro, IGEO/UFRJ)

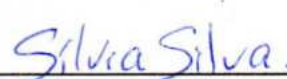
Mc. Kimmolly Ferrari Ferreira
(MicroCentro, IGEO/UFRJ)

Aprovada em: 28/11/2024

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Prof. Dr. Aristóteles de Moraes Rios Netto


Profa. Dra. Kátia Leite Mansur


Profa. Dra. Sílvia Clara Pereira da Silva

UFRJ
Rio de Janeiro
2024

Dedicado à Priscilla, Livia, Henrique, e toda a minha família.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Claudia Guterres Vilela e Aristóteles Netto, pela orientação incansável, paciência e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Seus conhecimentos e comprometimento foram fundamentais para meu aprendizado e para a concretização deste projeto.

À minha coorientadora, Kimmolly Ferrari Ferreira, agradeço a disponibilidade, pelas sugestões valiosas, e por todo o apoio técnico e acadêmico que me ajudaram a explorar com profundidade o fascinante mundo dos foraminíferos.

Aos meus colegas de curso, que estiveram ao meu lado durante essa jornada acadêmica, compartilho minha gratidão pelo companheirismo, pelas trocas de ideias e pelo incentivo constante. Em especial cito os grandes amigos Davi Gabriel, Diego Velasquez, Gabriel Dois, mestre Marllon Evaristo, Leonardo Vieira e Pedro Ivo. Vários momentos, dentro e fora das salas de aula, principalmente durante os campos, foram memoráveis, e tornaram essa caminhada mais leve e gratificante.

Aos professores do curso de Geologia da UFRJ, sou imensamente grato por todo o conhecimento compartilhado, pela inspiração e pelo estímulo ao pensamento crítico ao longo desses anos. Especialmente, agradeço aos professores que conduziram as atividades de campo durante a graduação. Foram eles que me levaram para fora das salas de aula, para o coração da geologia, onde as rochas contam suas histórias e as estruturas revelam seus segredos. Cada viagem, cada explicação sob o sol escaldante ou a chuva inesperada, foi mais do que um aprendizado, foi uma experiência que acendeu em mim a paixão pela geologia de uma forma que livros jamais poderiam fazer.

Aos funcionários da Universidade Federal do Rio de Janeiro, agradeço por todo o suporte logístico, técnico e administrativo, sobretudo aos motoristas, que nos conduziram com segurança aos quatro cantos do país. Um abraço Damião, Ednaldo e Wanderley.

Por fim, agradeço à minha família e amigos, que me deram força e apoio emocional em todas as etapas, sempre acreditando em mim e me incentivando a persistir.

A cada um que, de alguma forma, contribuiu para que este trabalho se tornasse realidade, meu sincero muito obrigado. Este TCC é um reflexo do apoio e do aprendizado que recebi de todos vocês.

RESUMO

NEVES, Pedro Alvim Carneiro Peixoto. **Caracterização da assembleia de foraminíferos no litoral do Rio Grande Norte, região de Rio do Fogo, com ênfase na preservação ambiental.** 2024, 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O litoral leste do Rio Grande do Norte abriga um rico ecossistema recifal situado na faixa costeira dos municípios de Maxaranguape, Rio do Fogo e Touros, com três bancos corálíneos, conhecidos localmente por “parrachos”. Parte deste rico ecossistema, os foraminíferos são organismos unicelulares marinhos pertencentes ao Reino Chromista. São particularmente úteis para inferir características de regiões costeiras e oceânicas por possuírem uma ampla distribuição geográfica e batimétrica, serem bastante sensíveis a alterações ambientais, e possuírem uma carapaça que se preserva no sedimento. O estudo tem como principal objetivo a identificação das assembleias de foraminíferos da região dos parrachos de Rio do Fogo através da sua classificação em gêneros e espécies, além do cálculo de diversos índices ecológicos. As tecas dos foraminíferos também foram classificadas taxonomicamente. A análise destes dados tem o potencial de constituir um importante registro para ações de conservação deste ambiente vulnerável. Neste estudo foram coletadas amostras de sedimento superficial de fundo nos recifes de coral do Rio do Fogo. Como resultado, foram encontradas espécies típicas de ambiente recifal, como *Amphistegina lessonii*, *Quinqueloculina lamarckiana*, *Archaias angulatus*, *Peneroplis carinatus* e *Sorites marginalis*. As análises indicam um ambiente propício ao crescimento de recifes, com boas condições para o desenvolvimento da assembleia atual. A baixa taxa de sedimentação e o volume reduzido de material clástico favoreceram a preservação das tecas. A presença atual de tecas escurecidas e amareladas sugere elevada taxa de transporte, retrabalhamento e bioturbação, caracterizando um ambiente de energia relativamente elevada. Além disso, o desgaste e fragmentação das carapaças podem estar associados à bioturbação e à influência de atividades humanas, como o turismo intenso na região, o que demanda atenção e manejo adequados.

Palavras-chave: foraminíferos; tafonomia; ambientes recifais; geoconservação

ABSTRACT

NEVES, Pedro Alvim Carneiro Peixoto. **Characterization of the foraminiferal assemblage on the coast of Rio Grande do Norte, Rio do Fogo region, with emphasis on environmental conservation.** 2024, 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

The eastern coastline of Rio Grande do Norte hosts a rich reef ecosystem located along the coastal area of the municipalities of Maxaranguape, Rio do Fogo, and Touros, featuring three coral banks locally known as "parrachos." As part of this rich ecosystem, foraminifera are unicellular marine organisms belonging to the Chromista Kingdom. These microorganisms are particularly useful for inferring characteristics of coastal and oceanic regions due to their wide geographical and bathymetric distribution, sensitivity to environmental changes, and the preservation of their tests in sediments. The study aims primarily to identify the foraminiferal assemblages in the Parrachos de Rio do Fogo region by classifying them into genera and species, as well as calculating various ecological indices. The foraminiferal tests were also classified taxonomically. The analysis of this data has the potential to provide an important record for conservation efforts in this vulnerable environment. In this study, surface sediment samples were collected from the coral reefs in the study area. Typical reef environment species were identified, such as *Amphistegina lessonii*, *Quinqueloculina lamarckiana*, *Archaias angulatus*, *Peneroplis carinatus*, and *Sorites marginalis*. The analyses indicate a favorable environment to reef growth, with conditions for the development of the current assemblage. Low sedimentation rates and a reduced volume of clastic material support the preservation of the tests. The recent presence of darkened and yellowish tests suggests high transport rates, reworking, and bioturbation, characterizing a relatively high-energy environment. Furthermore, the abrasion and fragmentation of the foraminiferal shells may be associated with bioturbation and human activities, such as intensive tourism in the region, which requires careful attention and proper management.

Keywords: foraminifera; taphonomy; reef environments; geoconservation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos parrachos, e área da APARC	15
Figura 2 – Intensa atividade turística no parracho de Rio do Fogo, próximo à praia de Peroba	16
Figura 3 – Parte do parracho do Rio do Fogo , próximo ao local de coleta das amostras	17
Figura 4 – Ambiente recifal do parracho Rio do Fogo, próxima à praia de Perobas.	19
Figura 5 – Constituição da teca de foraminíferos; estrutura interna das paredes	21
Figura 6 – Reprodução dos foraminíferos, alternância de gerações sexual e assexual	22
Figura 7 – Ontogenia de um foraminífero plantônico	23
Figura 8 – Distribuição estratigráfica de alguns grupos de foraminíferos	24
Figura 9 – Desenho esquemático dos padrões de coloração (A) e desgaste (B) observados durante a identificação dos foraminíferos.....	31
Figura 10 – Museu dos Corais, um espaço interativo e inclusivo sobre os oceanos com foco na conservação desses ambiente marinho.....	36
Figura 11 – Localização da área de estudo	37
Figura 12 – A Bacia Potiguar	39
Figura 13 – Mapa das unidades geoambientais no Parrachos de Rio do Fogo.....	41

Figura 14 – <i>Digital Bathymetry Model (DBM)</i> . Em linhas tracejadas estão as posições dos perfis batimétricos selecionados.....	42
Figura 15 – Análise dos perfis batimétricos transversais ao Parrachos de Rio do Fogo.	42
Figura 16 – Gêneros de foraminíferos representados nas amostras	45
Figura 17 – Proporção dos gêneros dos foraminíferos representados nas amostras	46
Figura 18 – Espécies de foraminíferos representados nas amostras	47
Figura 19 – Fotomicrografias com a câmera AxioCam MRc 5 acoplada à lupa Zeiss Discovery V12	48
Figura 20 – Fotomicrografias com a câmera AxioCam MRc 5 acoplada à lupa Zeiss Discovery V12	49
Figura 21 – Distribuição dos padrões tafonômicos observados em amostras analisadas.....	49
Figura 22 – Porcentagem tafonômica encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo	50
Figura 23 – Quantidade de padrões tafonômicos encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo	50
Figura 24 – Distribuição das alterações de cor observadas nas amostras.....	51
Figura 25 – Proporção entre as alterações de cor encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo	52
Figura 26 – Total de foraminíferos com alterações de cor, por amostra do estudo ..	52

Figura 27 – Riqueza total por amostra	53
Figura 28 – Número de espécies não identificadas por amostra	53
Figura 29 – Relação entre o total de indivíduos, diversidade e equitatividade em cada uma das amostras	56
Figura 30 – Variabilidade espacial e temporal no Índice FORAM para amostras de Key Largo, Flórida	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos gêneros de foraminíferos encontrados no estudo para o cálculo do FORAM Index (FI).....	44
Tabela 2 – Índice de Shannon por amostra (H').....	54
Tabela 3 – Equitatividade de Pielou (J') por amostra	55
Tabela 4 – Índice de Dominância de Simpson (D) por amostra	55
Tabela 5 – Índice FORAM Index (FI) por amostra.....	56
Tabela 6 – Comparação dos resultados tafonômicos entre os parrachos de Maracajaú e Rio do Fogo	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	15
2. BASES CONCEITUAIS.....	18
2.1. Recifes de Coral.....	18
2.1.1.. Geologia dos Corais.....	19
2.2. Foraminíferos.....	20
2.2.1.. Descrição e Biologia	20
2.2.2.. Distribuição Estratigráfica.....	23
2.2.3.. Importância e Aplicações.....	24
2.3. Índices Ecológicos	26
2.3.1.. Riqueza.....	26
2.3.2.. Índice de Shannon (H')	26
2.3.3.. Equitatividade de Pielou (J')	27
2.3.4.. Índice de Dominância de Simpson (D).....	27
2.3.5.. FORAM Index (FI)	28
2.4. Tafonomia	29
2.4.1.. Foraminíferos e Tafonomia.....	30
2.5. Geoconservação.....	31
2.5.1.. Patrimônio Geológico.....	31
2.5.2.. Geodiversidade.....	32
2.5.3.. Gestão do Patrimônio Geológico e da Geodiversidade.....	33

2.5.4.. Geoconservação e os Parrachos de Rio do Fogo	34
3. ÁREA DE ESTUDO.....	37
3.1. Localização	37
3.2. Geologia Regional	38
3.3. Os Parrachos do Litoral Leste do Rio Grande do Norte	39
3.3.1.. O Parracho de Rio do Fogo	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5. RESULTADOS.....	45
5.1. Abundância Relativa por Gênero	45
5.2. Abundância Relativa por Espécie	47
5.3. Tafonomia	49
5.4. Coloração	51
5.5. Índices Ecológicos	53
5.5.1. Riqueza	52
5.5.2. Índice de Shannon (H')	54
5.5.3. Equitatividade de Pielou (J')	55
5.5.4. Índice de Dominância de Simpson (D')	55
5.5.5. Comparação dos Índices por Amostra.....	56
5.5.6. FORAM Index (FI)	56
6. DISCUSSÃO	57
6.1. Assembleia de Foraminíferos	57

6.2. Tafonomia e Coloração	58
6.2.1. Coloração.....	58
6.2.2. Tafonomia.....	59
6.3. Índices Ecológicos	61
7. CONCLUSÃO	64
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O litoral leste do Rio Grande do Norte abriga um rico ecossistema recifal localizado na faixa costeira dos municípios de Maxaranguape, Rio do Fogo e Touros. Este sistema de recifes é constituído por três bancos coralíneos conhecidos localmente como “parrachos”. O estudo concentrou-se nos parrachos de Rio do Fogo, localizados na costa dos municípios de Touros e Rio do Fogo (Figura 1). Com sua espetacular beleza natural e rica biodiversidade marinha, o local tem atraído um número crescente de turistas interessados em atividades como mergulho e passeios de barco (Figura 2). Segundo a Federação do Comércio de Bens, Serviços e Turismo do Rio Grande do Norte (Fecomércio RN), os parrachos do litoral leste receberam cerca de 17,1% do total de turistas que visitaram o estado durante o ano de 2024. Além disso, a atividade pesqueira é de grande importância socioeconômica e cultural para a região.

Com o objetivo de diminuir essas pressões antrópicas impostas aos ambientes recifais, foi criada através do Decreto estadual nº 15.476, de 6 de junho de 2001, a Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corai (APARC). Com uma área de mais de 136 mil hectares, a APARC visa assegurar a preservação da biodiversidade marinha dos parrachos.

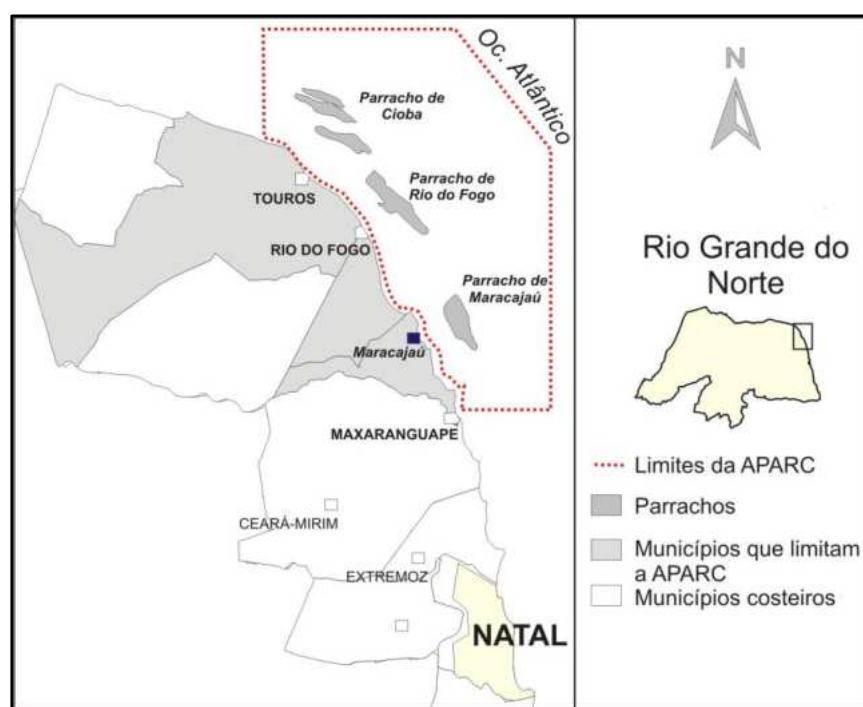


Figura 1 – Localização dos parrachos, e área da APARC (adaptado de Amaral et al. 2013)

Os parrachos são estruturas de origem biogênica formadas principalmente por carbonato de cálcio e desempenham um papel fundamental na proteção da linha costeira contra a erosão, além de oferecerem habitat para uma grande diversidade de organismos marinhos (Figura 3). Parte deste ecossistema, a assembleia de foraminíferos é um indicador chave da saúde de ambientes recifais (Hallock *et al.* 2003). Os foraminíferos são organismos unicelulares, sobretudo marinhos, pertencentes ao Reino Chromista (Pawlowsky *et al.* 2013). Característica marcante destes organismos é o fato de possuírem uma carapaça de formas bastante variadas, composta principalmente por carbonato de cálcio, ou da aglutinação de partículas do sedimento em que vivem. De forma menos comum, existem ainda tecas orgânicas e silicosas. Esses organismos são particularmente úteis para inferir diversas características de regiões costeiras e oceânicas por possuírem uma ampla distribuição geográfica e batimétrica, serem bastante sensíveis a alterações ambientais, e possuírem uma carapaça que tende a se preservar na cobertura sedimentar. Dentre as várias aplicações paleoecológicas e biostratigráficas, os foraminíferos têm sido amplamente estudados devido à sua utilidade como indicadores paleoambientais (Vilela, 2011).



Figura 2 – Intensa atividade turística no parracho de Rio do Fogo, próximo à praia de Perobas (<https://www.natalonline.com/> acessado em 06/11/2024)

Apesar de sua importância ecológica e sociocultural, esta região carece de importantes estudos taxonômicos referentes ao foraminíferos localizados nos parrachos. Podemos citar um estudo preliminar de Wanderley e Ferreira (1990), além de um artigo que foca na tafonomia das carapaças dos foraminíferos (Batista *et al.*, 2007). Destaca-se a tese de doutorado de Batista (2008), que apresenta um estudo de foraminíferos bentônicos como bioindicadores ecológicos de ecossistemas recifais. No entanto, nenhuma dessas publicações utilizou-se de amostras do parracho de Rio do Fogo, concentrando-se nos recifes de Maracajaú, mais ao sul.

Este estudo justifica-se, portanto, pela importância de compreender a dinâmica ecológica desses ambientes recifais e pela necessidade de contribuir para a conservação desse ecossistema vulnerável, preenchendo uma lacuna no conhecimento científico associado à região. O trabalho tem como principal objetivo a identificação das assembleias de foraminíferos bentônicos da região dos parrachos de Rio do Fogo, seus valores de diversidade, riqueza, e outros importantes índices ecológicos. Também foram realizados estudos tafonômicos com o objetivo de investigar a influência dos fatores ambientais e antrópicos na microfauna de foraminíferos locais. A análise destes dados tem o potencial de constituir um importante registro para ações de conservação, preservação e recuperação deste ambiente vulnerável ao correlacionar os dados obtidos com possíveis impactos antrópicos, especialmente relacionados ao turismo, visando a integridade do ecossistema recifal.



Figura 3 – Parte do parracho do Rio do Fogo , próximo ao local de coleta das amostras (<https://www.natalonline.com/> acessado em 06/11/2024)

2. BASES CONCEITUAIS

2.1. Recifes de Coral

Recifes de coral são estruturas calcárias formadas principalmente por esqueletos de corais, geralmente associadas a crostas de algas calcárias e briozoários incrustantes, além de outras formações de carbonato de cálcio de origem biológica, como conchas e carapaças (Figura 4). Apresenta, em geral, formato circular ou elíptico (Correia & Sovierzoski, 2005). Constituem ecossistemas marinhos presentes em mais de 100 países ao redor do mundo, conhecidos tanto por sua beleza natural, quanto por sua importância como os ambientes de maior biodiversidade nos oceanos (Adey, 2000). Comunidades coralíneas são identificadas no Brasil desde o Parcel de Manuel Luís, no Maranhão (aproximadamente 0°53' S, 44°16' W), até os recifes de Viçosa, na região de Abrolhos (aproximadamente 18°01' S, 39°17' W). Além disso, estão presentes em diversas ilhas oceânicas, como o Atol das Rocas e Fernando de Noronha (Maida & Ferreira, 2006). Pode-se citar como um rico ambiente recifal os rodólitos (algas calcárias) da Cadeia Vitória-Trindade (Meireles *et al.*, 2015, Vilela *et al.*, 2019), e os corais da cidade de Búzios, na região do Lagos, estado do Rio de Janeiro.

Os corais são ambientes muito sensíveis, e a preservação das comunidades de recifes depende de alguns fatores físicos e químicos, como a temperatura da água, geralmente acima de 20°C, o nível de salinidade, a ausência de turbidez, taxas de oxigênio dissolvido, disponibilidade de nutrientes, além de substratos adequados para a fixação de larvas. (Correia e Sovierzoski, 2005). Os corais que constroem recifes, conhecidos como corais hermatípicos, possuem algas simbióticas que dependem da energia solar para efetuar a fotossíntese, limitando essas espécies a profundidades onde a luz consegue penetrar (Batista, 2008).

Nesse sentido, o impacto das atividades turísticas na saúde dos recifes de coral é uma preocupação crescente, especialmente em regiões onde o turismo é intenso. Além disso, num contexto de aumento do dióxido de carbono atmosférico, o aquecimento global ameaça tanto os recifes de coral em águas rasas e quentes quanto as comunidades que deles dependem, devido a dois principais fatores de estresse ambiental em escala global: o aquecimento excessivo da superfície do mar,

que pode provocar branqueamento e mortalidade dos corais, e a acidificação dos oceanos. Nessas áreas, ações rápidas e fundamentadas em ciência e dados serão essenciais para proteger vidas e meios de subsistência (Cinner *et al.* 2016)

2.1.1. Geologia dos Corais

O ciclo de expansão e diminuição de áreas ocupadas por recifes de corais nos mares globais ao longo do tempo geológico foi profundamente influenciado pela disposição dos paleocontinentes, dos paleoceanos, e pelas mudanças climáticas globais. Durante o Paleozoico, por exemplo, os recifes enfrentaram uma drástica redução devido à colisão do Gondwana e Euramérica, evento que alterou as correntes e a temperatura global. Ao final do Neogeno, a deriva dos continentes deu origem aproximadamente às configurações dos oceanos atuais, afetando a distribuição e a evolução dos corais hermatípicos. Já durante o Pleistoceno, ocorreram diversos períodos glaciais e interglaciais, que influenciaram as correntes marítimas e temperaturas dos oceanos. Os recifes do Atlântico, desta maneira, são geologicamente jovens, datando, em grande parte, da última glaciação, há cerca de 10 a 15 mil anos (Batista, 2008).



Figura 4 – Ambiente recifal do parracho Rio do Fogo, próxima à praia de Perobas (<https://www.natalonline.com/> acessado em 06/11/2024)

No Brasil, a evolução dos recifes está associada às variações do nível do mar ao longo do Holoceno, em um padrão que difere dos modelos propostos para outras regiões do mundo. Em relação à formação do banco de recifes do litoral leste do Rio Grande do Norte, duas hipóteses são consideradas. A mais aceita sugere que os parrachos integram um grande banco de corais que se estende desde Abrolhos (BA) até o Cabo de São Roque (RN), em uma área intraplaca de linhas costeiras holocênicas caracterizada por uma planície de marés abandonada e outros depósitos intertidais, que formariam os parrachos da região (Bezerra *et al.*, 2003).

As estruturas dos corais também são influenciadas pela microfauna de foraminíferos, pois estes são os mais prolíficos produtores de sedimentos de CaCO_3 nos oceanos modernos (Hallock, 1995). Em profundidades eufóticas de mares subtropicais e tropicais, muitos foraminíferos planctônicos e bentônicos têm sua calcificação auxiliada por algas endossimbiontes. Nesses ambientes de águas rasas e em baixas latitudes, foraminíferos bentônicos que abrigam algas endossimbiontes competem com corais construtores de recifes e algas calcárias na produção de CaCO_3 (Hallock, 1995).

2.2. Foraminíferos

2.2.1. Descrição e Biologia

Os foraminíferos são organismos unicelulares marinhos pertencentes ao Reino Chromista (Pawłowski *et al.*, 2013). Eles surgiram no período Cambriano, há cerca de 570 milhões de anos, e persistem até os dias atuais, habitando principalmente ambientes marinhos. Os foraminíferos planctônicos vivem suspensos na coluna d'água e são encontrados em diversas profundidades, desde as águas superficiais até regiões mais profundas. Eles têm a capacidade de migrar pela coluna d'água, possivelmente através de variações no conteúdo gasoso do seu protoplasma. Suas adaptações estruturais e funcionais refletem esse modo de vida, tornando-os essenciais para a ecologia oceânica e para o estudo da história geológica da Terra (Vilela, 2011).

Por outro lado, os foraminíferos bentônicos podem ser fixos ao substrato (sésseis) ou móveis (vágeis), e podem viver sobre (epifaunais) ou dentro (infaunais) dos sedimentos. Em relação ao substrato, os foraminíferos bentônicos fixos podem

crescer sobre superfícies vivas, como algas e gramíneas marinhas, bem como sobre restos de organismos mortos, incluindo corais, crustáceos, briozoários, moluscos, tubos de poliquetas e outros foraminíferos. Eles também podem habitar fundos de cascalho, areia e lama. Os macroforaminíferos, por exemplo, tendem a se desenvolver melhor em substratos como algas e fragmentos de coral do que em sedimentos soltos (Batista, 2008). A presença de indivíduos vivos desses organismos em amostras de sedimento geralmente indica que foram deslocados de seu substrato original por correntes ou ação das ondas (Hallock, 1984). Macroforaminíferos de tecas mais robustas e resistentes a impactos foram selecionados evolutivamente em ambientes de águas agitadas, pois isso reduz o risco de serem remobilizados, e, portanto, adaptaram-se a ambientes de alta energia. Os foraminíferos móveis, por sua vez, deslocam-se emitindo reticulópodes, que são estruturas finas e anastomosadas com textura granular (Batista, 2008).

Os foraminíferos possuem uma carapaça, ou teca, de formas variadas, composta por carbonato de cálcio. Essa teca em algumas espécies pode ser aglutinada através de partículas do sedimento onde vivem ou, mais raramente, ser de composição orgânica ou silicosa (Figura 5). A teca é formada por uma ou várias câmaras que se comunicam através de uma ou mais aberturas chamadas forâmen. Para se alimentar, os foraminíferos estendem os pseudópodes denominados de reticulópodes para fora da carapaça, formando uma rede para capturar partículas de matéria orgânica, diatomáceas ou outros pequenos organismos. O alimento é então absorvido através de correntes de citoplasma até o interior da teca. O processo de excreção ocorre no sentido inverso (Vilela, 2011).

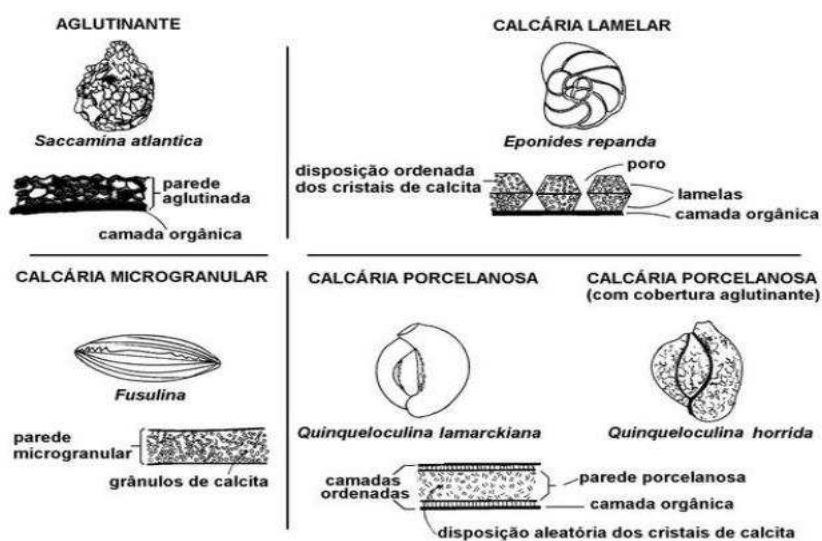


Figura 5 – Constituição da teca de foraminíferos; estrutura interna das paredes (Vilela, 2011; modificado de Brasier 1980)

Os foraminíferos possuem a capacidade de se reproduzir tanto de forma assexual quanto sexual, sendo a reprodução assexual uma característica constante, enquanto a sexual pode ou não ocorrer. Nos casos em que ambos os modos estão presentes, há uma alternância de gerações entre as fases assexuada e sexuada (Figura 6). Durante a reprodução assexual, um único organismo gera diversos descendentes por divisão. Esses descendentes se desenvolvem e, na fase sexual, produzem gametas biflagelados que se combinam para formar um zigoto. O zigoto, por sua vez, cresce e dá origem a um novo indivíduo que retomará a reprodução assexual, completando o ciclo de vida (Vilela, 2011).

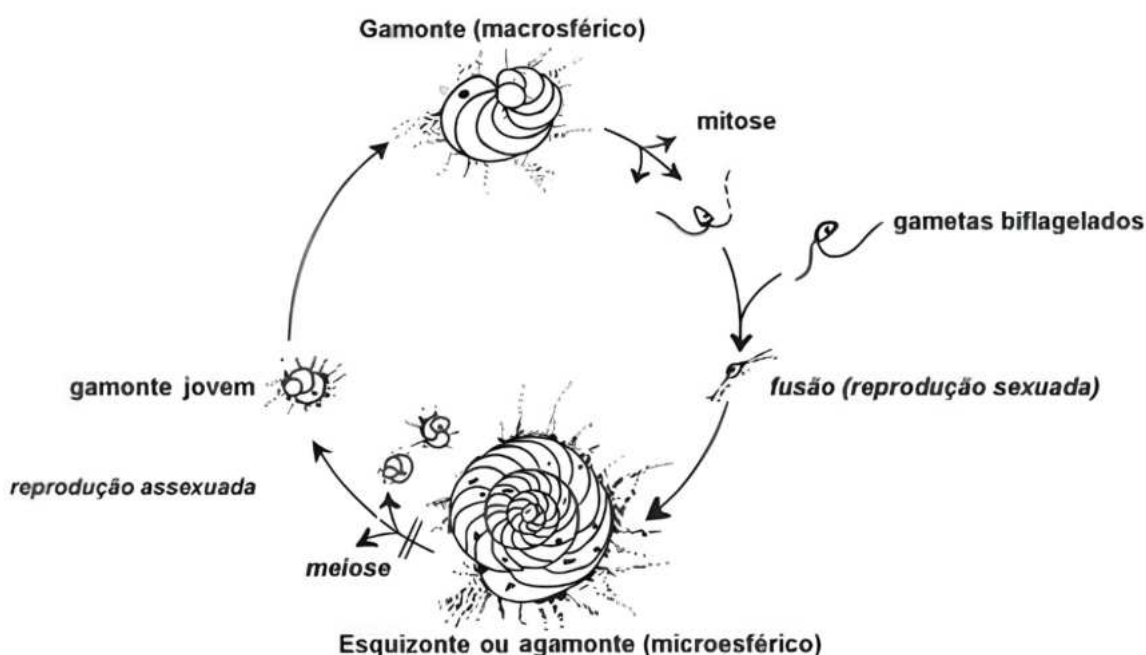


Figura 6 – Reprodução dos foraminíferos, alternância de gerações sexual e assexual (Vilela, 2011; modificado de Brasier 1980)

O crescimento dos foraminíferos ocorre por meio da extensão de uma parte do citoplasma para fora da última câmara, através da abertura, formando um molde onde os minerais são depositados para criar uma nova câmara (Figura7). Estudos laboratoriais demonstraram que esse processo pode ser concluído em cerca de quatro horas. Em muitos casos, a formação da teca acontece em estágios distintos, que podem apresentar variações na ornamentação ou na disposição das câmaras, resultando em diferenças significativas entre as formas jovens e adultas (Vilela, 2011).

Os pseudópodes (reticulópodes) desempenham, portanto, um papel fundamental para os foraminíferos, atuando na sua locomoção, fixação, alimentação, construção da teca e na sua proteção. É por meio dos pseudópodes que esses

organismos interagem com o ambiente (Vilela, 2011).

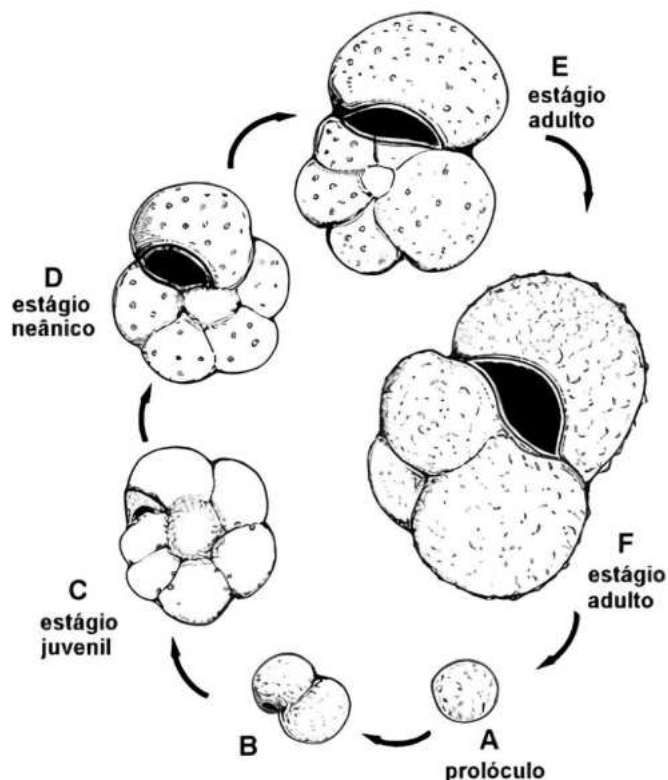


Figura 7 – Ontogenia de um foraminífero planctônico (Vilela, 2011; modificado de Lee *et al.* 1991)

2.2.2. Distribuição Estratigráfica

Os primeiros foraminíferos, que surgiram no início do Cambriano, eram organismos simples, com carapaças aglutinantes e uniloculares, apresentando apenas um único forâmen. Durante o Paleozoico, ocorreram avanços significativos, com o desenvolvimento de carapaças microgranulares (ordem *Fusulinida*), que já exibiam uma alta complexidade na organização das câmaras, além de formas aglutinantes mais elaboradas. Enquanto os microgranulares foram extintos no Triássico, as formas aglutinantes conseguiram persistir até os dias atuais, abrangendo uma grande diversidade de espécies (Vilela, 2011).

No Paleozoico médio, apareceram as primeiras carapaças de calcário porcelanoso, associadas à ordem *Miliolida*, que também se estendem até o presente. Já os calcários lamelares, pertencentes a várias ordens, surgiram no Permo-Triássico e também continuam até os dias de hoje. O Triássico, embora com registros limitados de foraminíferos, parece ter sido um período importante para o surgimento de novas

espécies, como os miliolídeos e nodosarídeos, que se tornariam dominantes no Jurássico. As primeiras formas planctônicas surgiram apenas no Jurássico e persistem até o presente (Figura 8). A diversificação dessas formas continuou ao longo do Cretáceo, com uma significativa proliferação tanto das formas planctônicas quanto das bentônicas (Vilela, 2011).

Os foraminíferos bentônicos de grandes dimensões sofreram uma significativa redução no início do Paleogeno, quando ocorreu uma extinção em massa que afetou diversas formas bentônicas e planctônicas. Atualmente, os grandes foraminíferos estão restritos a 13 ordens, enquanto as formas menores, tanto planctônicas quanto bentônicas, continuam amplamente representadas (Vilela, 2011). A Figura 8 ilustra a distribuição estratigráfica de alguns grupos de foraminíferos.

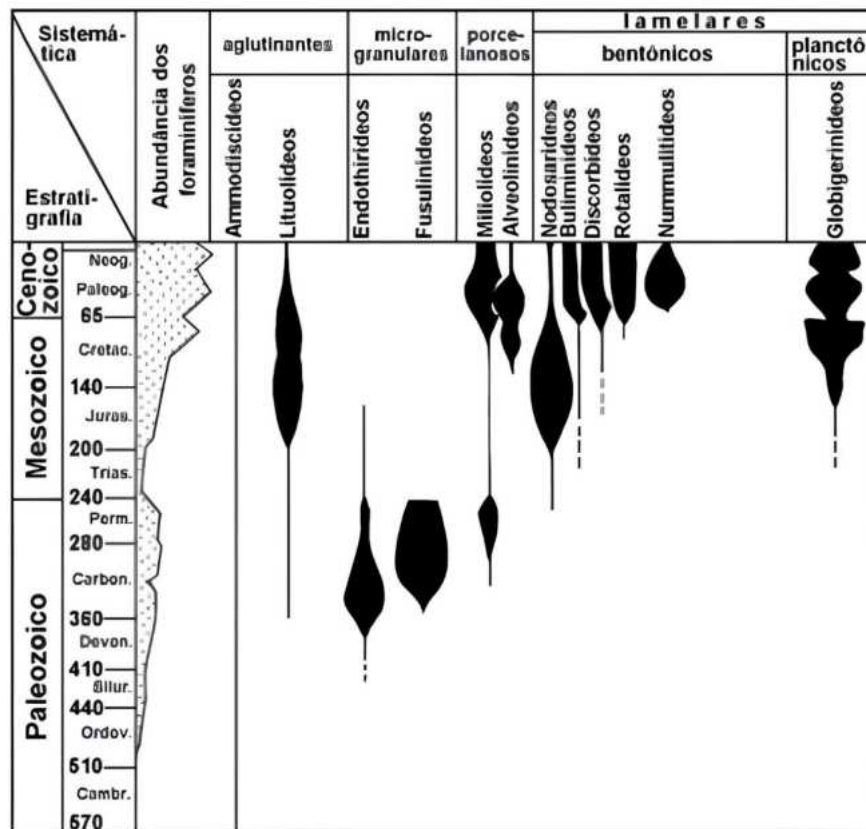


Figura 8 – Distribuição estratigráfica de alguns grupos de foraminíferos (Vilela, 2011; modificado de Bignot 1988)

2.2.3. Importância e Aplicações

Os foraminíferos bentônicos têm ampla aplicação na datação de rochas do Paleozoico, com destaque para os fusulinídeos (ordem *Fusulinida*). A partir do

Jurássico, o surgimento dos foraminíferos planctônicos trouxe grande relevância para a bioestratigrafia, devido à sua ampla distribuição geográfica e à fácil identificação de linhagens nas camadas estratigráficas. A definição de intervalos bioestratigráficos (biozonas) ganhou destaque global, especialmente graças às pesquisas desenvolvidas por empresas de petróleo. Esses estudos permitem não apenas datações precisas, mas também análises paleoambientais, essenciais para a identificação de rochas geradoras e reservatórios de petróleo (Vilela, 2011).

No Brasil, foraminíferos têm sido fundamentais em reconstituições paleogeográficas de várias bacias costeiras, como a de Sergipe-Alagoas, onde foram identificadas 16 biozonas de foraminíferos planctônicos e bentônicos no período Cretáceo. Em rochas do Pleistoceno, foraminíferos planctônicos são utilizados para determinar os limites das glaciações e gerar curvas paleoclimáticas baseadas em mudanças na orientação das tecas ou em associações de espécies adaptadas a temperaturas quentes ou frias (Vilela, 2011).

Estudos realizados no talude continental da Bacia de Campos demonstraram a eficácia da análise da abundância de foraminíferos bentônicos e planctônicos para caracterizar elementos de estratigrafia de sequências. Essa análise revelou um ciclo Transgressivo - Regressivo - Transgressivo no Pleistoceno-Holoceno. Além disso, a ecologia dos foraminíferos bentônicos modernos é crucial para interpretações paleoambientais, pois suas associações são influenciadas por fatores como profundidade, temperatura, salinidade, tipo de substrato, disponibilidade de oxigênio e nutrientes. Essas associações podem ser usadas para criar modelos de distribuição em ambientes recentes, que ajudam a entender ambientes semelhantes no passado geológico (Vilela, 2011; Gasparini *et al.*, 2024).

A morfologia dos foraminíferos bentônicos reflete seu habitat, seja epifaunal ou infaunal, o que auxilia na interpretação ambiental. Em substratos argilosos, sua distribuição está relacionada aos níveis de oxigênio. Em sedimentos ricos em matéria orgânica, formam associações epifaunais em áreas oxigenadas, na interface sedimento-água, e associações infaunais em zonas de baixo oxigênio, dentro do sedimento. A análise dessas associações permite inferir variações nos níveis de oxigênio em sedimentos antigos e modernos (Vilela, 2011).

2.3. Índices Ecológicos

Índices ecológicos são métricas utilizadas para quantificar e avaliar a diversidade, abundância e distribuição das espécies em um ecossistema, fornecendo uma visão abrangente sobre sua saúde e estabilidade. Esses índices ajudam ecologistas e gestores ambientais a monitorarem a biodiversidade, entender a estrutura das comunidades e detectar mudanças ambientais

2.3.1. Riqueza (S)

Refere-se ao número total de espécies encontradas em um ecossistema ou área específica. É uma medida básica, amplamente utilizada como um indicador de biodiversidade com diversos objetivos, como monitoramento para priorizar ações de manejo ou conservação , além de ser utilizada no cálculo de outros indicadores ecológicos (Rossi, 2011).

2.3.2. Índice de Shannon(H')

O Índice de Diversidade de Shannon (H') é uma das métricas mais usadas na ecologia para avaliar a diversidade de espécies dentro de uma comunidade. Esse índice leva em consideração tanto a riqueza de espécies (número total de espécies presentes) quanto a abundância relativa (a proporção de cada espécie em relação ao total de indivíduos) (Magurran, 2004).

Seu valor mínimo ocorre quando todos os indivíduos pertencem à mesma espécie e o máximo quando cada indivíduo pertence uma espécie diferente. Quanto maior o H' mais diversa é a comunidade, refletindo dois atributos: número de espécies e a equitatividade. (Batista, 2008)

Cálculo:

$$H' = - \sum (p_i \cdot \ln p_i)$$

Onde:

- p_i é a proporção de indivíduos da espécie i em relação ao total de indivíduos na comunidade

2.3.3. Equitatividade de Pielou (J')

A equitatividade indica o quão uniformemente os indivíduos estão distribuídos entre as diferentes espécies em uma comunidade. O índice de Pielou varia de 0 a 1, onde 1 indica uma distribuição completamente uniforme. O índice de equitatividade de Pielou (J') é usado em conjunto com o Índice de Shannon, pois é calculado como:

$$J' = \frac{H'}{\ln S} = \frac{H'}{H'_{\text{máx}}}$$

onde S é o número total de espécies (Riqueza) na comunidade e H' o Índice de Shannon medido. Em uma situação em que todas as espécies tivessem abundâncias iguais, $H' = H'_{\text{máx}} = \ln S$. A razão entre a diversidade observada e a diversidade máxima pode, portanto, ser usada para medir a equitatividade (Magurran, 2004).

2.3.4. Índice de Dominância de Simpson (D)

Mede a probabilidade de que dois indivíduos aleatórios de uma comunidade pertençam à mesma espécie. Valores mais altos indicam maior dominância de poucas espécies, enquanto valores mais baixos sugerem uma comunidade mais diversificada.

Cálculo:

$$D = \sum p_i^2$$

Onde:

- p_i é a proporção de indivíduos de cada espécie

2.3.5. FORAM Index (FI)

O índice “FORAM” (Foraminifera in Reef Assessment and Monitoring) oferece um procedimento simples para determinar a adequação de ambientes bentônicos para comunidades dominadas por organismos simbióticos algais (Hallock *et al.*, 2003). O FI baseia-se em uma série de observações históricas de que recifes de corais saudáveis tem abundantes foraminíferos de grandes dimensões e que são, portanto, constituintes importantes dos sedimentos. A principal analogia fisiológica entre corais construtores de recifes e foraminíferos maiores é a dependência de ambos os grupos de simbiontes algais para aumentar o crescimento e a calcificação. À medida que o ambiente se torna inadequado para a sobrevivência dos foraminíferos com simbiontes algais, suas carapaças mortas se tornam raras nos sedimentos, e os remanescentes ficam cada vez mais corroídos (Hallock *et al* 2003).

Os procedimentos para calcular o FI levam em conta, portanto, a abundância relativa de gêneros específicos de foraminíferos, que são somados em grupos funcionais, que incluem os foraminíferos maiores que hospedam simbiontes algais, além de foraminíferos oportunistas tolerantes à poluição, que dominam ambientes de alto estresse, e pequenos táxons que proliferam em resposta à nutrificação. A premissa básica sobre a qual este índice é baseado é que ambientes adequados para o crescimento de recifes de corais têm sedimentos nos quais pelo menos 25-30% das tecas de foraminíferos foram produzidos por gêneros que hospedam simbiontes algais. Uma amostra que contém 25% de tecas de foraminíferos maiores e 75% de tecas de outros pequenos táxons tem um FI = 4. Ambientes com sedimentos desprovidos de carapaças de foraminíferos maiores, por definição, têm um FI ≤ 2. Valores de FI entre 2 e 4 indicam que as condições são marginais a inadequadas para a recuperação das comunidades de corais após um evento de mortalidade (Hallock *et al* 2003).

Em primeiro lugar é calculada a proporção (P) de espécimes para cada grupo funcional somando os espécimes de cada gênero desse grupo (N) e dividindo pelo número total de espécimes contados (T):

$$P_s = N_s / T$$

$$P_o = N_o / T$$

$$Ph = Nh/T$$

Nas fórmulas acima o subscrito "s" representa os foraminíferos com simbioses algais, o subscrito "o" representa foraminíferos oportunistas e o subscrito "h" representa outros foraminíferos pequenos e heterotróficos.

O cálculo final está explicitado abaixo:

$$FI = (10 \times Ps) + Po + (2 \times Ph)$$

2.4. Tafonomia

O termo "Tafonomia", derivado do grego (*tafós* = sepultamento; *nomos* = leis), foi introduzido por Efremov em 1940 para designar o estudo detalhado do processo de transição de organismos mortos da biosfera para a litosfera, abrangendo a dinâmica de fossilização. Embora essa definição seja bastante ampla, ela também se relaciona a conceitos como processos de fossilização, paleobiologia, bioestratigrafia e actuopaleontologia. Behrensmeier e Kidwell (1985) modernizaram o conceito, definindo a tafonomia como o estudo dos processos de preservação e sua influência na informação contida no registro fóssil, dividindo-se em bioestratigrafia e diagênese dos fósseis (Batista, 2008).

A tafonomia foca nos fatores físico-químicos e biológicos que causam mudanças nos restos orgânicos após a morte, afetando sua preservação no registro fóssil. Elementos como a química da água, padrões de circulação, taxas de sedimentação e atividades bioerosivas podem ser registrados nas carapaças fósseis e contemporâneas (Batista, 2008).

Diversos processos tafonômicos, inseridos na bioestratigrafia, auxiliam na interpretação ambiental, dentre eles (Batista, 2008) :

- **Incrustação:** aponta a exposição do esqueleto na interface água-sedimento, além de indicar padrões ambientais específicos.
- **Fragmentação:** ocorre pela quebra de esqueletos, associada a ambientes de alta energia devido à ação de ondas ou correntes. A fragmentação também pode

aumentar em casos de perfurações causadas por predação ou simbiose.

- **Bioerosão:** envolve estruturas erosivas causadas por organismos em substratos duros, sendo uma ferramenta valiosa em reconstruções paleoambientais. Este processo destrói rapidamente a matriz carbonática, influenciando a morfologia de recifes rasos e profundos e contribuindo para o fluxo de nutrientes e gases dissolvidos em recifes modernos. A bioerosão pode ser realizada por organismos como bactérias, fungos microscópicos, algas, gastrópodes, esponjas e poliquetas.

- **Dissolução:** um processo que pode destruir informações, sendo influenciado pela estabilidade dos minerais constituintes do fóssil em relação às condições físico-químicas do ambiente. Fósseis menores tendem a dissolver mais rapidamente, especialmente em manguezais e estuários, onde o pH baixo pode dissolver conchas calcárias em pouco tempo. O efeito da dissolução é intensificado em áreas com alta bioturbação.

- **Deformação:** refere-se às mudanças físicas, químicas ou biológicas que ocorrem nos restos orgânicos ou fósseis durante os processos pós-morte. Essas alterações podem incluir a compactação, fraturas, distorções mecânicas ou químicas e a recristalização, resultando em modificações na forma, tamanho ou integridade dos fósseis.

2.4.1. Foraminíferos e Tafonomia

A degradação das tecas de foraminíferos começa logo após sua morte e é intensificada por fatores como predação, dissolução do carbonato, compactação dos sedimentos e transporte. Esses processos afetam de forma seletiva as tecas, alterando a proporção entre espécies vivas e mortas no registro sedimentar. As tecas podem reter vestígios de matéria orgânica, tornando-se fontes para bactérias anaeróbias após o soterramento. Além disso, a cor das tecas é usada para inferir taxas de deposição, erosão e retrabalhamento dos sedimentos (Figura 9) (Batista, 2008).

A oxidação dos grãos carbonáticos ocorre rapidamente, e a cor dos grãos reflete a história deposicional do sedimento. Normalmente brancos, os grãos podem adquirir colorações devido à infiltração de matéria orgânica ou à presença de ferro e

manglês. Grãos pretos indicam alta taxa de retrabalhamento, enquanto grãos marrons sugerem erosão frequente e baixa sedimentação. Grãos amarelos apontam para taxas de oxidação moderadas, enquanto grãos brancos podem representar sedimentação recente ou ausência de ferro (Batista, 2008).

O padrão mosqueado está relacionado à estrutura interna dos grãos, sendo comum em foraminíferos com suturas e microporos escurecidos, indicando transições entre condições ambientais distintas (Batista, 2008).

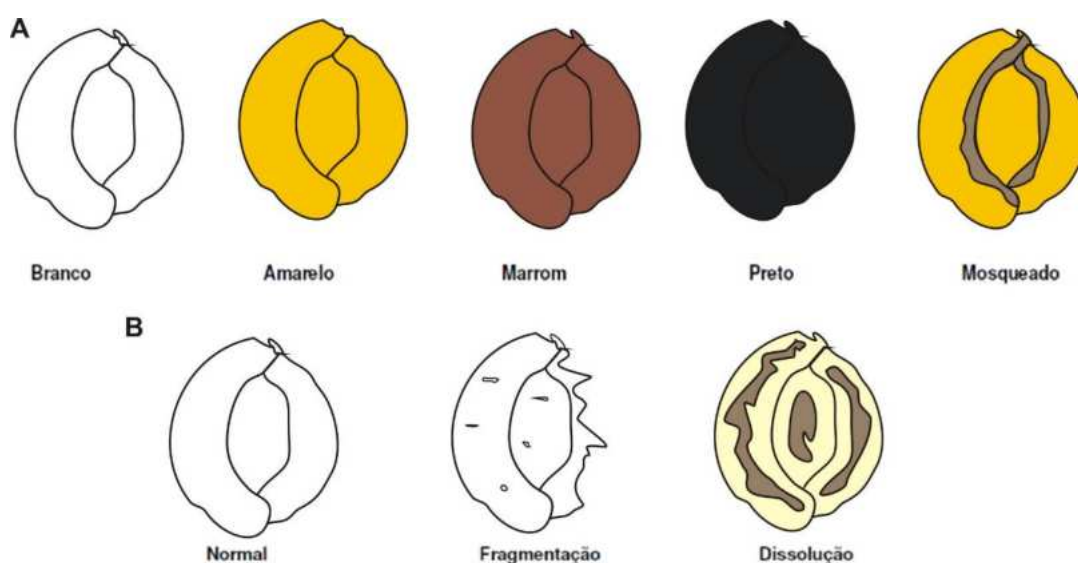


Figura 9 – Desenho esquemático dos padrões de coloração (A) e desgaste (B) observados durante a identificação dos foraminíferos. (Batista, 2008; modificado de Moraes 2001)

Diversos processos de desgaste, como dissolução e fragmentação, podem alterar a estrutura dos foraminíferos. A dissolução, comum em ambientes de baixa energia, com sedimentos orgânicos, torna a superfície da teca opaca e perfurada, facilitando a fragmentação. Em contraste a fragmentação é mais frequente em ambientes de alta energia, mas pode ser causada pela fragilização da teca devido à dissolução e bioerosão, não estando, portanto, limitada a um único tipo de ambiente deposicional (Batista, 2008).

2.5. Geoconservação

2.5.1. Patrimônio Geológico

A conservação e valorização do patrimônio geológico surgiram de movimentos

conservacionistas do final do século XX, com a percepção de que certos locais naturais precisavam ser protegidos. O interesse pela preservação de elementos geológicos remonta às origens da Geologia como ciência, quando estudiosos como Hutton e Lyell usaram afloramentos para entender a evolução geológica, promovendo uma visão científica e observacional da Terra. Essa abordagem ajudou a desvincular a Geologia de interpretações teológicas e levou à formulação de hipóteses sobre a idade da Terra e os fósseis por exemplo. Apesar da importância do patrimônio geológico, seu reconhecimento formal na legislação ambiental ainda é limitado. Antes de tudo é necessário promover o entendimento consistente dos conceitos relacionados ao patrimônio geológico, sendo importante padronizar os termos e suas definições, considerando as diferentes interpretações existentes (Carcavilla *et al.*, 2007).

Existem diversas definições de patrimônio geológico. Uma das mais clássicas é a de Cendrero (1996): “o conjunto de recursos naturais, não renováveis, sejam eles formações rochosas, estruturas geológicas, acumulações sedimentares, formas de relevo ou jazidas minerais, petrológicas ou paleontológicas, que permitem reconhecer, estudar e interpretar a evolução da história da Terra e dos processos que a moldaram, com valor científico, cultural, educativo, paisagístico ou recreativo correspondente.”

O estudo do patrimônio geológico possui objetivos próprios, fundamentados em sua definição, além de outros propósitos específicos que possam justificar ou direcionar uma determinada pesquisa e sua aplicação. O estudo do patrimônio busca 1) identificar, 2) valorizar, 3) conservar e 4) divulgar os locais que possuam um elevado valor em relação às geociências. Apenas atendendo a esses quatro objetivos é possível estabelecer uma gestão completa do patrimônio geológico. O estudo do patrimônio geológico pode ser abordado de diferentes maneiras, embora possa ser agrupado em quatro categorias, que correspondem aos objetivos acima descritos: catalogação, valorização, conservação e divulgação-utilização (Carcavilla *et al.*, 2007).

2.5.2. Geodiversidade

O conceito de geodiversidade surgiu como um análogo à biodiversidade e, embora seu uso seja recente, é cada vez mais frequente na literatura científica e de conservação. O termo refere-se à variedade de elementos geológicos, incluindo

rochas, minerais, fósseis, formas de relevo e solos, além dos processos naturais que os originaram (Gray, 2004). A geodiversidade é essencial para o entendimento da história da Terra e do funcionamento dos ecossistemas, especialmente porque sustenta a biodiversidade (Carcavilla *et al.*, 2007).

Apesar do aumento no uso do termo, o reconhecimento da geodiversidade por parte da sociedade e de instituições de gestão ambiental ainda é limitado, diferentemente da biodiversidade, que possui diretrizes internacionais para sua proteção. O seu conceito foi formalizado pela primeira vez em 1991 durante uma reunião internacional de geoconservação e, desde então, tem sido adotado com significados variados. A geodiversidade é uma propriedade intrínseca do território e está relacionada a aspectos geográficos, climáticos e culturais, mas o estudo da geodiversidade foca especificamente nas características geológicas.

Os conceitos de geodiversidade e o patrimônio geológico estão estreitamente relacionados. A geodiversidade nos mostrará a variedade geológica do local, e o patrimônio geológico, o valor dos elementos presentes (Carcavilla *et al.*, 2007).

2.5.3. Gestão do Patrimônio Geológico e da Geodiversidade

O objetivo central dos estudos de patrimônio geológico e geodiversidade é a conservação dos elementos que os constituem. Para que essa conservação seja efetiva, é necessário primeiro identificar as principais características da área em questão, como singularidade, valor, relevância e fragilidade, a fim de aplicar o método de conservação mais adequado. A geoconservação envolve uma abordagem interdisciplinar, que integra aspectos geológicos, ambientais, legais, de planejamento territorial, econômicos e sociais. Carcavilla *et al.* (2007) definem geoconservação como “o conjunto de técnicas e medidas destinadas a assegurar a conservação (incluindo a reabilitação) do patrimônio geológico e da geodiversidade, baseado na análise de seus valores intrínsecos, sua vulnerabilidade e no risco de degradação.”

A geoconservação vai além de simplesmente proteger elementos geológicos contra a destruição; também visa prevenir, corrigir e minimizar os impactos que possam sofrer, respeitando o ritmo natural dos processos geológicos ativos. Dada a variedade de tamanhos e vulnerabilidades dos elementos geológicos, as medidas de conservação podem variar de técnicas avançadas a simples orientações de conduta para visitantes. Nesse contexto, a conservação não é responsabilidade exclusiva de

gestores e políticos; os cidadãos têm um papel essencial, tornando a educação e a conscientização fundamentais (Carcavilla *et al.*, 2007).

O patrimônio geológico e a geodiversidade possuem valores que vão além da geologia, incluindo aspectos culturais, científicos, estéticos e paisagísticos. A geoconservação busca preservar esses valores, que podem ser afetados não apenas pela destruição direta, mas também pela perda de naturalidade do local. Manter o potencial de uso e o aspecto natural de um ambiente é, portanto, parte central da geoconservação (Carcavilla *et al.*, 2007).

2.5.4. Geoconservação e os Parrachos de Rio do Fogo

É possível listar uma série de impactos relacionados ao turismo nos parrachos do litoral leste do Rio Grande do Norte (Silva, 2020):

1. Danos Físicos aos Corais:

- Contato Direto: o toque, pisoteio ou coleta de corais pelos turistas podem causar danos estruturais aos recifes, afetando a saúde dos corais e a biodiversidade associada.
- Ancoragem de Embarcações: o uso de âncoras em áreas sensíveis pode destruir formações coralinas, pois podem quebrar ou arrastar os corais.

2. Poluição:

- Resíduos Sólidos: o aumento do fluxo de visitantes pode levar ao acúmulo de lixo, como plásticos e embalagens, que podem ser ingeridos pela fauna marinha ou depositarem-se sobre os recifes, danificando-os.
- Contaminação Química: protetores solares não biodegradáveis e outros produtos químicos utilizados pelos turistas podem afetar a qualidade da água.
- Descargas de Embarcações: vazamentos de óleo e combustível das embarcações de turismo podem contaminar o ambiente marinho.

3. Distúrbios na Vida Marinha:

- Estresse nos Organismos: a presença constante e próxima de humanos pode estressar peixes e outras espécies, alterando seus

comportamentos naturais e padrões de reprodução.

- Alimentação Artificial: a prática de alimentar animais marinhos para atrair a atenção dos turistas pode desequilibrar a dieta natural e causar dependência ou superpopulação de determinadas espécies.

4. Degradação do Habitat:

- Erosão Costeira: a construção de infraestruturas turísticas próximas à costa pode levar à remoção da vegetação nativa, aumentando a erosão e sedimentação nos recifes.
- Sedimentação: a movimentação de barcos e pessoas pode suspender sedimentos, reduzindo a clareza da água e afetando a fotossíntese dos corais.

5. Pressão sobre os Recursos Naturais:

- Sobrepesca: o aumento da demanda por frutos do mar em áreas turísticas pode levar à sobrepesca, afetando o equilíbrio ecológico.
- Extração de Recursos: a coleta de conchas, corais e outros recursos naturais como souvenirs contribui para a degradação do ambiente.

Com o objetivo de ajudar a mitigar essas ameaças a Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC), foi criada em 2001 pelo Decreto N° 15.746, e visa proteger a biodiversidade marinha na região costeira dos municípios de Maxaranguape, Rio do Fogo e Touros, no litoral norte do Rio Grande do Norte. Com mais de 136 mil hectares (Figura 1), a APARC visa preservar o ambiente dos recifes de corais, reconhecidos como um dos habitats marinhos mais ricos em biodiversidade (Figura 10).

Nesse sentido, para manter o controle turístico e diminuir as pressões antrópicas impostas aos ambientes recifais foram criadas diretrizes com base no Plano de Manejo e Zoneamento da Unidade, entre as quais, as regras de conduta nesses ecossistemas e a limitação de quotas diárias de visitação turística. O monitoramento destas atividades é efetuado pelo Programa de Monitoramento da APARC, e, para sua operacionalização, é cobrada uma Tarifa Ambiental aplicada a cada visitante transportado por empresas e comunidade local. A Tarifa Ambiental é definida através da Portaria N°027/2013 do IDEMA-RN.



Figura 10 – Museu dos Corais, um espaço interativo e inclusivo sobre os oceanos com foco na conservação desse ambiente marinho (<http://www.idema.rn.gov.br> acesso em 06/11/2024)

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

A localização das amostras analisadas neste estudo encontra-se destacada na imagem abaixo (Figura 11), nas coordenadas 5°13'47"S 35°22'04"W:

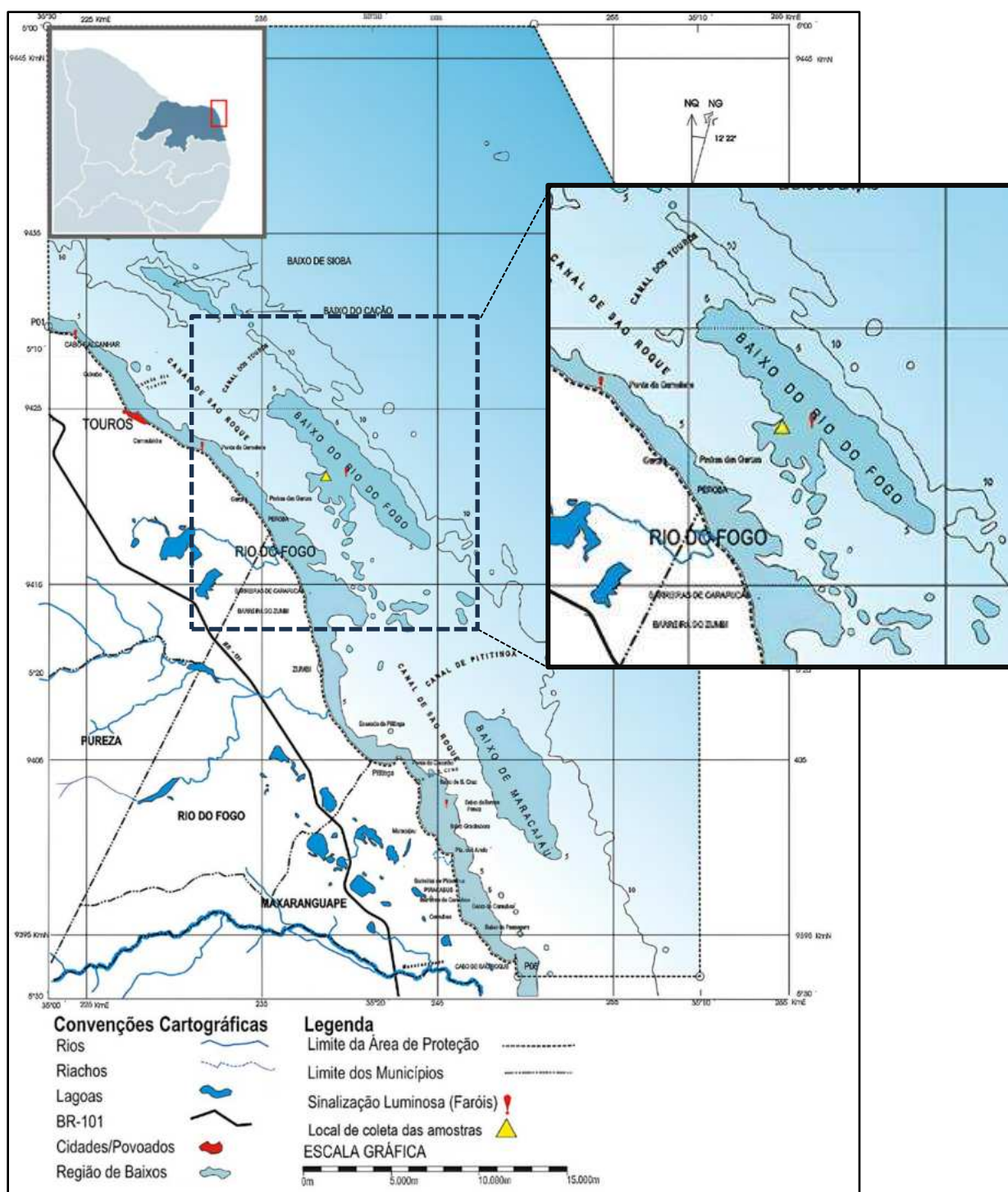


Figura 11 – Localização da área de estudo (modificado de Link, 2023)

3.2. Geologia Regional

A Bacia Potiguar (Figura 12), uma bacia *pull-apart* localizada no extremo leste da Margem Equatorial Brasileira, abrange áreas tanto emersas quanto submersas, principalmente no estado do Rio Grande do Norte e parcialmente no Ceará. A bacia é geologicamente limitada ao sul, leste e oeste pelo embasamento cristalino, estendendo-se para o norte até a profundidade de cerca de 2.000 metros. Seus limites são definidos pelo Alto de Fortaleza a oeste, separando-a da Bacia do Ceará, e pelo Alto de Touros, a leste. Com uma área total de cerca de 48.000 km², 45% dessa extensão está emersa (21.500 km²) e 55% submersa (26.500 km²) (Pessoa Neto *et al* 2007).

A Bacia Potiguar possui três estágios de evolução: rifte (Neocomiano-Eoaptiano), pós-rifte (Neoaptiano-Eoalbio) e drifte (Albio-Holoceno). O primeiro estágio é caracterizado por depósitos continentais, o segundo por depósitos transicionais, enquanto o último por depósitos marinhos (Almeida *et al* 2015). A Supersequência Rifte é composta por depósitos flúvio-deltaicos e lacustres, a Supersequência Pós-Rifte, por sua vez, apresenta uma sequência flúvio-deltaica, onde ocorrem os primeiros sinais de incursão marinha, e a Supersequência Drifte é caracterizada por uma sequência transgressiva flúvio-marinha sobreposta por uma sequência regressiva de sedimentos clásticos e carbonáticos. Depósitos vulcânicos da Formação Macau foram também acumulados entre o Eoceno e o Oligoceno (Pessoa Neto *et al* 2007).

A porção submersa da Bacia Potiguar é composta por depósitos mistos carbonáticos e siliciclásticos. A fisiografia da plataforma é dividida em três partes: plataformas interna, média e externa. Diversas características morfológicas de fundo do mar foram identificadas, como ondas de sedimentos, corpos arenosos isolados de mar raso, zonas de recifes de corais, *beachrocks*, e vales incisos (Almeida *et al* 2015).

As sequências regressivas representam o registro estratigráfico entre o Neocampaniano e Recente. Caracterizam-se por sistemas mistos compostos por leques costeiros, sistemas de plataformas rasas com borda carbonática, e sistemas de talude/bacia. A Sequência N60, mais jovem, é formada por sedimentos aluviais provenientes dos rios Açu e Mossoró na porção proximal, sedimentos de praia e dunas na região costeira, sedimentos siliciclásticos intercalados com sedimentos bioclásticos de plataforma externa, e sedimentos finos no talude e bacia profunda (Pessoa Neto *et al* 2007).

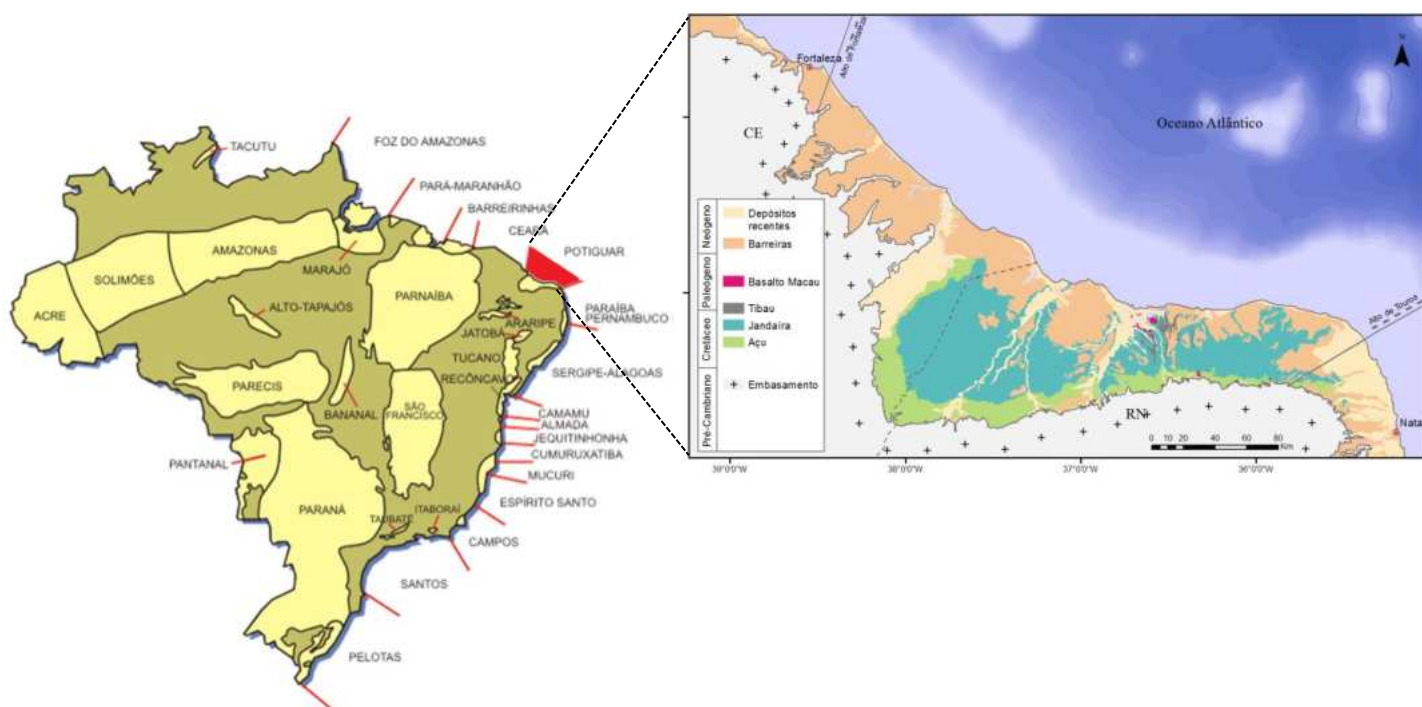


Figura 12 – A Bacia Potiguar (modificado de Pessoa Neto 2007)

3.3. Os Parrachos do Litoral Leste do Rio Grande do Norte

Os corpos de recife, localmente chamados de "parrachos", são recifes de coral costeiros alinhados paralelamente à linha da costa. Eles se desenvolvem sobre um substrato rígido, composto por arenito, relacionado a paleolinhas costeiras. Este litoral apresenta águas claras durante a maior parte do ano. O complexo recifal da região caracteriza-se como um grupo de recifes de forma oval, localizados a alguns quilômetros da costa, constituídos de estruturas simples, formadas geralmente por numerosos pináculos em um fundo arenoso raso. Os recifes de coral da área costumam se orientar na direção NW-SE, com comprimento de 8 a 12 km, e são apresentados como um conjunto de montes e recifes isolados (Araújo e Amaral, 2016).

3.3.1. O Parracho de Rio do Fogo

Araújo e Amaral (2016) identificaram quatro principais zonas geomorfológicas no Parracho de Rio do Fogo:

- **Recife Posterior:** Região do recife voltada para a costa, que geralmente sofre menor impacto das ondas devido ao efeito de proteção pelo Topo do Recife e Frente do Recife.
- **Topo do Recife:** A porção mais elevada do recife em qualquer estágio de seu crescimento e, em águas rasas, a parte superior do recife que recebe a maior parte do impacto do vento e das ondas.
- **Frente do Recife:** Esta zona se estende da zona de arrebentação (final do Topo do Recife) até uma profundidade indefinida (início do Recife Externo), onde a inclinação topográfica começa a suavizar ou mudar de padrão. Essa zona também absorve grande parte da energia das ondas.
- **Recife Externo:** Localizado na porção externa do recife, após a Frente do Recife, e se estende até onde a topografia ambiental se estabiliza.

O complexo recifal possui forma elíptica, orientado no sentido SE-NW, com cerca de 12 km de comprimento e 3 km de largura, em uma proporção de 4:1. São observadas feições geomorfológicas específicas, como um banco de areia a sudoeste dos parrachos, conectando o recife ao continente próximo à comunidade de Rio do Fogo. Além disso, foram identificadas três discontinuidades morfológicas transversais ao corpo do recife: a primeira, ao norte, conhecida como Canal da Barreta, separa o Recife das Garças do Recife de Rio do Fogo; a segunda, central, visível em imagens de satélite, se estende até a isóbata de 10 metros; e a terceira, ao sul, é sutil, mas detectável em análises batimétricas (Figura 13).

O setor externo do recife é delimitado pelo Canal de Rio do Fogo, uma depressão de cerca de 9 km de comprimento e até 14 metros de profundidade, localizada paralelamente ao recife e a aproximadamente 1000 metros de distância. A análise dos perfis batimétricos (Figuras 14 e 15) revelou que a área de recife posterior é mais extensa, com 3,5 km, devido à presença do banco de areia interno. O Topo do Recife apresenta pouca variação em largura, enquanto a Frente do Recife varia entre 1,5 e 2 km.

A inclinação acentuada do limite externo da Frente do Recife é influenciada pelo Canal de Rio do Fogo, cuja profundidade excede os 12 metros, enquanto o recife

posterior tem profundidade máxima inferior a 6 metros. Essa morfologia mostra uma parede quase vertical na borda externa dos parrachos. A posição dos parrachos contribui para a retenção de sedimentos, resultando em alta turbidez da água nessa área.

O substrato necessário para a fixação dos recifes pode ter sido constituído por arenito ferruginoso, comum ao longo da costa leste do Rio Grande do Norte. Essas estruturas recifais estão associadas a flutuações do nível do mar no Holoceno, e alguns autores sugerem que os parrachos representam antigas linhas de costa. A elevação do nível do mar e condições ambientais específicas moldaram a estrutura geométrica atual dos recifes (Araújo e Amaral, 2016).

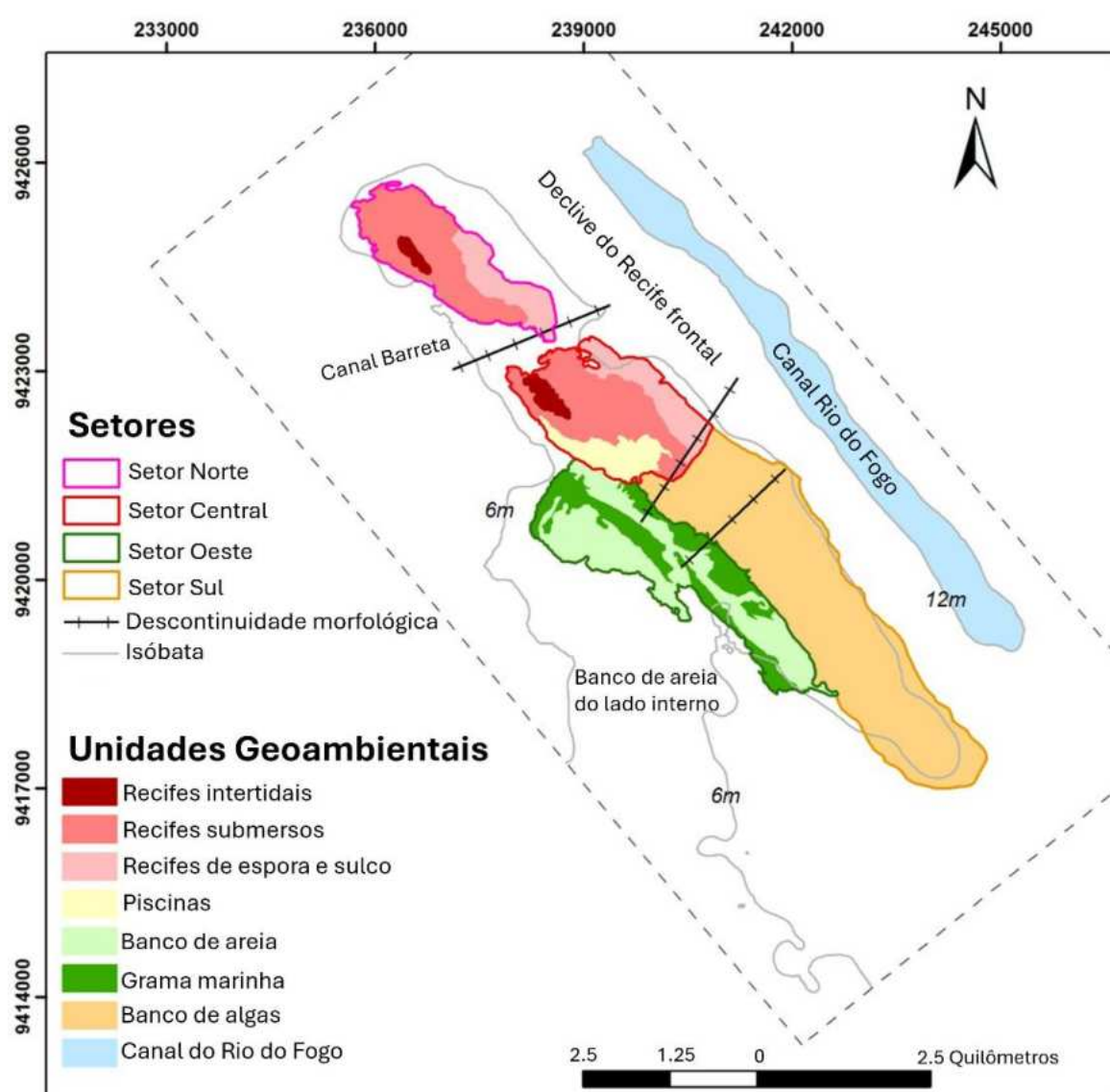


Figura 13 – Mapa das unidades geoambientais no Parrachos de Rio do Fogo (modificado de Araújo e Amaral 2016)

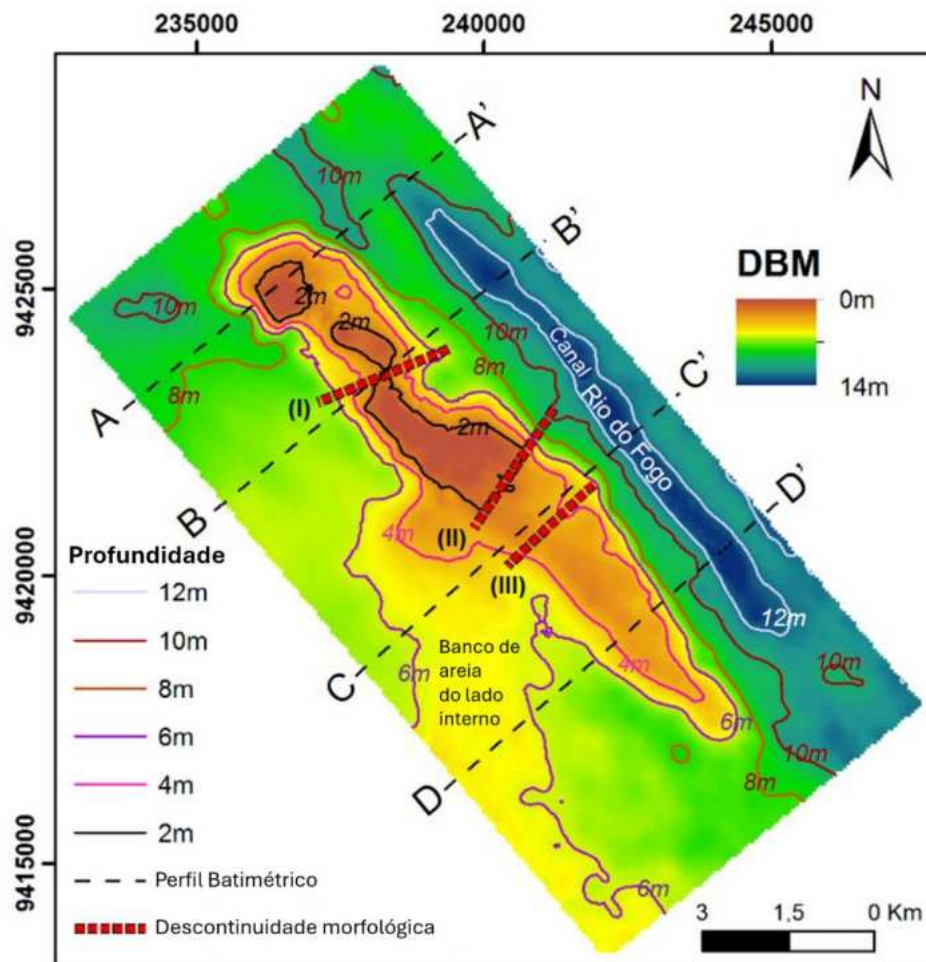


Figura 14 – *Digital Bathymetry Model (DBM)*. Em linhas tracejadas estão as posições dos perfis batimétricos selecionados (ver figura 15) (modificado de Araújo e Amaral 2016)

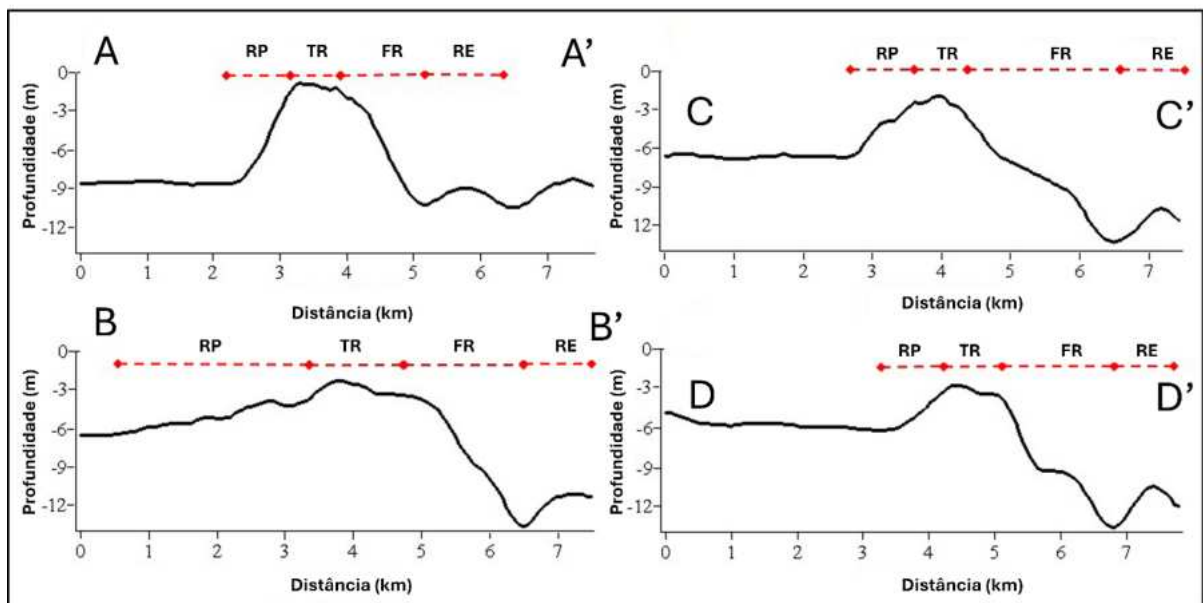


Figura 15 – Análise dos perfis batimétricos transversais ao Parrachos de Rio do Fogo. Legenda: RP (Recife Posterior); TR (Topo do Recife); FR (Frente do Recife); RE (Recife Externo). (modificado de Araújo e Amaral 2016)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No dia 31/07/2021 foram coletadas amostras de sedimento superficial de fundo na região dos parrachos, cuja localização exata encontra-se detalhada na Figura 11. Essas amostras foram submetidas a uma série de tratamentos laboratoriais para permitir a análise detalhada dos foraminíferos bentônicos presentes, incluindo o uso de corantes, separação física e triagem sob microscopia estereoscópica.

Durante a coleta as amostras foram embebidas em Rosa de Bengala, um corante vital que destaca os espécimes de foraminíferos vivos no momento da coleta. Este procedimento é fundamental, pois permite distinguir os organismos vivos daqueles já fossilizados ou em estágios avançados de degradação, facilitando a análise da ecologia atual da região.

Em laboratório, as amostras foram padronizadas em 20ml, lavadas com água corrente em peneiras de malha de 0,062 mm, procedimento essencial para separar a fração areia, que contém os foraminíferos, de partículas finas de sedimento, nas frações argila e silte.

Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura controlada de aproximadamente 50°C por cerca de 12 horas. Essa etapa de secagem garante a conservação dos microfósseis e evita a deterioração das estruturas mais frágeis. Após a secagem, o material foi armazenado em potes transparentes devidamente identificados

A triagem foi realizada com uma lupa estereoscópica modelo Zeiss Stemi 2000-C, ferramenta essencial para a observação detalhada dos foraminíferos. Utilizando um pincel fino, os espécimes de foraminíferos foram cuidadosamente separados dos sedimentos e de outros organismos presentes. A coleta prosseguiu até o atingimento de cerca de 300 exemplares. Esse trabalho de separação manual permite a coleta de espécimes individuais sem danos estruturais, assegurando que características importantes, como a integridade das tecas, sejam preservadas.

Os espécimes de foraminíferos foram cuidadosamente colocados em lâminas de fundo preto, o que facilita a visualização de detalhes morfológicos sob microscopia. As principais características utilizadas para a identificação das espécies incluíram, além da composição e disposição da teca, o padrão de desenvolvimento das câmaras, as particularidades da abertura, e o arranjo das câmaras. A classificação em gêneros

e espécies seguiu Loeblich e Tappan (1988) e bibliografia específica, tais como Cushman (1931, 1939). As espécies foram confirmadas através de Worms (2024).

Foram considerados também padrões específicos de alterações tafonômicas para melhor compreender o contexto ambiental e as condições de preservação dos fósseis. Entre esses padrões estão a incrustação, a fragmentação, a bioerosão e a dissolução. A consideração desses processos permitiu uma análise mais detalhada das amostras, auxiliando na avaliação da integridade e do histórico tafonômico dos foraminíferos encontrados.

As carapaças dos foraminíferos apresentaram diversas colorações variando desde branco-leitoso, amarelo claro, passando pelo marrom até o preto, além das coradas pelo corante Rosa de Bengala. Foram classificadas em três categorias: coradas, amareladas e escurecidas (marrons e pretas).

Para a determinação do FORAM Index (FI) foram classificados os gêneros encontrados seguindo os critérios descritos por Hallock et al. (2003) (Tabela 1).

Gênero	Classificação
<i>Ammonia</i>	Pequenos e heterotróficos
<i>Amphistegina</i>	Simbiótico
<i>Archaias</i>	Simbiótico
<i>Borelis</i>	Simbiótico
<i>Discorbis</i>	Pequenos e heterotróficos
<i>Pararotalia</i>	Oportunista
<i>Peneroplis</i>	Simbiótico
<i>Pyrgo</i>	Oportunista
<i>Quinqueloculina</i>	Oportunista
<i>Rotorbis</i>	Pequenos e heterotróficos
<i>Sorites</i>	Simbiótico
<i>Spiroloculina</i>	Pequenos e heterotróficos
<i>Textularia</i>	Estressor
<i>Triloculina</i>	Oportunista

Tabela 1 – Classificação dos gêneros de foraminíferos encontrados no estudo para o cálculo do FORAM Index (FI)

5. RESULTADOS

5.1. Abundância Relativa por Gênero

A Figura 16 apresenta a abundância relativa dos 14 gêneros identificados no presente estudo. Já a Figura 17 ilustra a proporção dos gêneros de foraminíferos representados nas amostras analisadas.

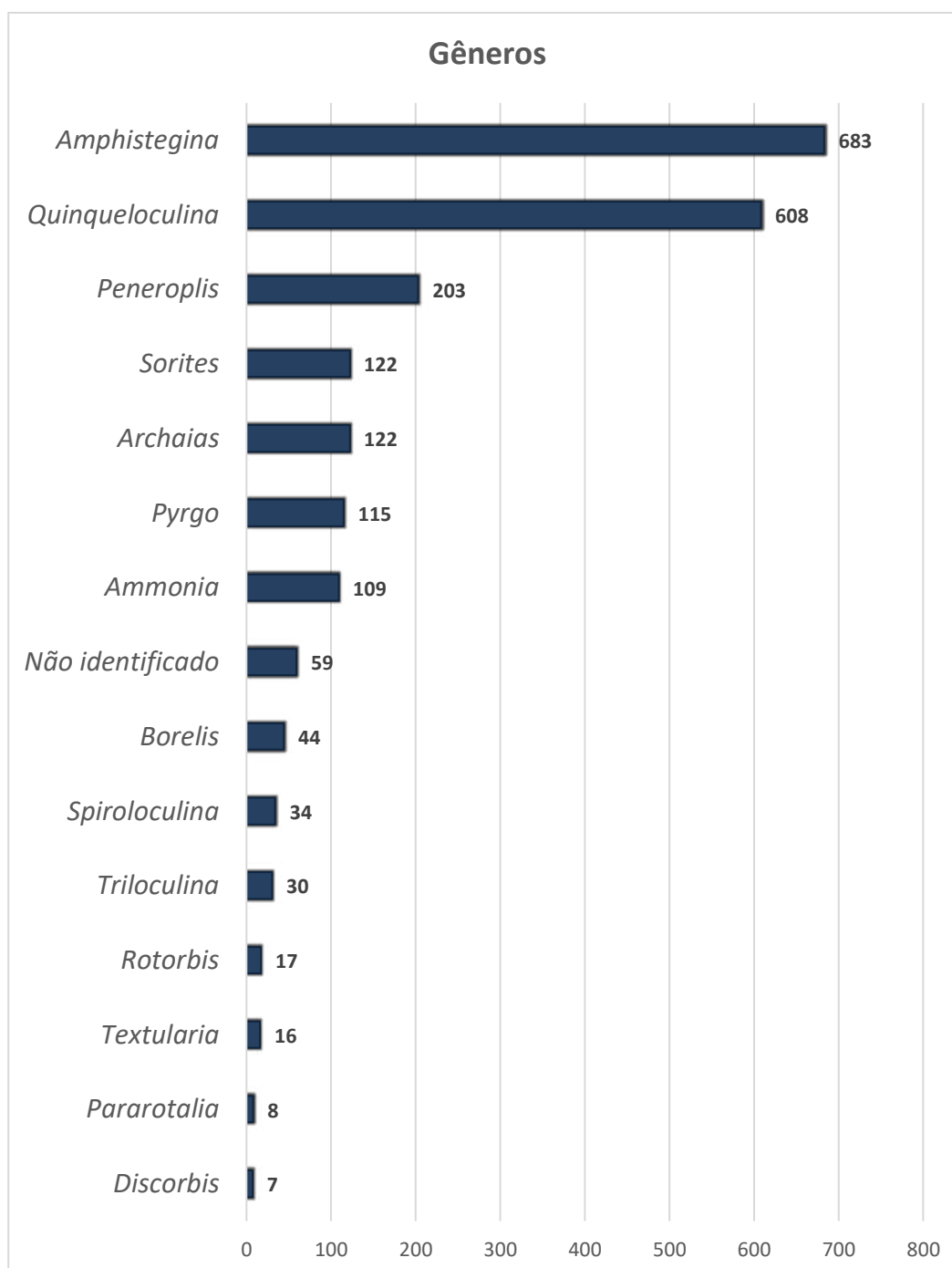


Figura 16 – Gêneros de foraminíferos representados nas amostras

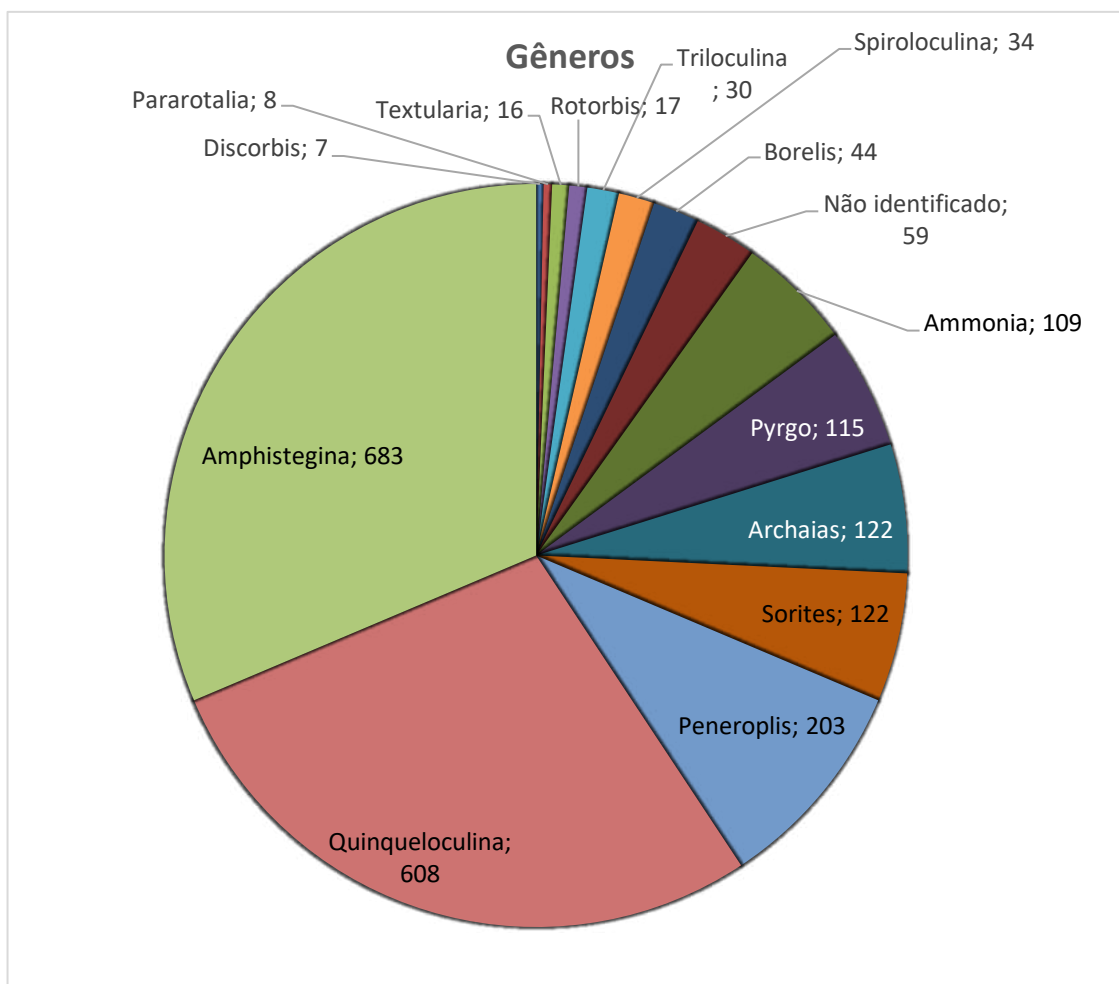


Figura 17 – Proporção dos gêneros dos foraminíferos representados nas amostras

Os dados apresentados mostram a abundância de foraminíferos por gênero, destacando diferenças significativas entre as quantidades de espécimes. *Amphistegina* foi o gênero mais representado, com **683** espécimes, seguido de *Quinqueloculina*, com **608** espécimes (Figura 17). Esses dois gêneros juntos compõem a maior parte da associação analisada (59%), indicando sua predominância no ambiente estudado,

Outros gêneros com alta representatividade incluem *Peneroplis* (203 espécimes), *Sorites* e *Archaia*, ambos com **122** espécimes. Foram corretamente identificados ao todo **14** gêneros no estudo

Adicionalmente, a categoria de espécimes "não identificados" (59 exemplares) sugere que outros gêneros podem estar presentes na assembleia local.

5.2. Abundância Relativa por Espécie

A Figura 18 apresenta a abundância relativa das 34 espécies identificadas nas amostras:

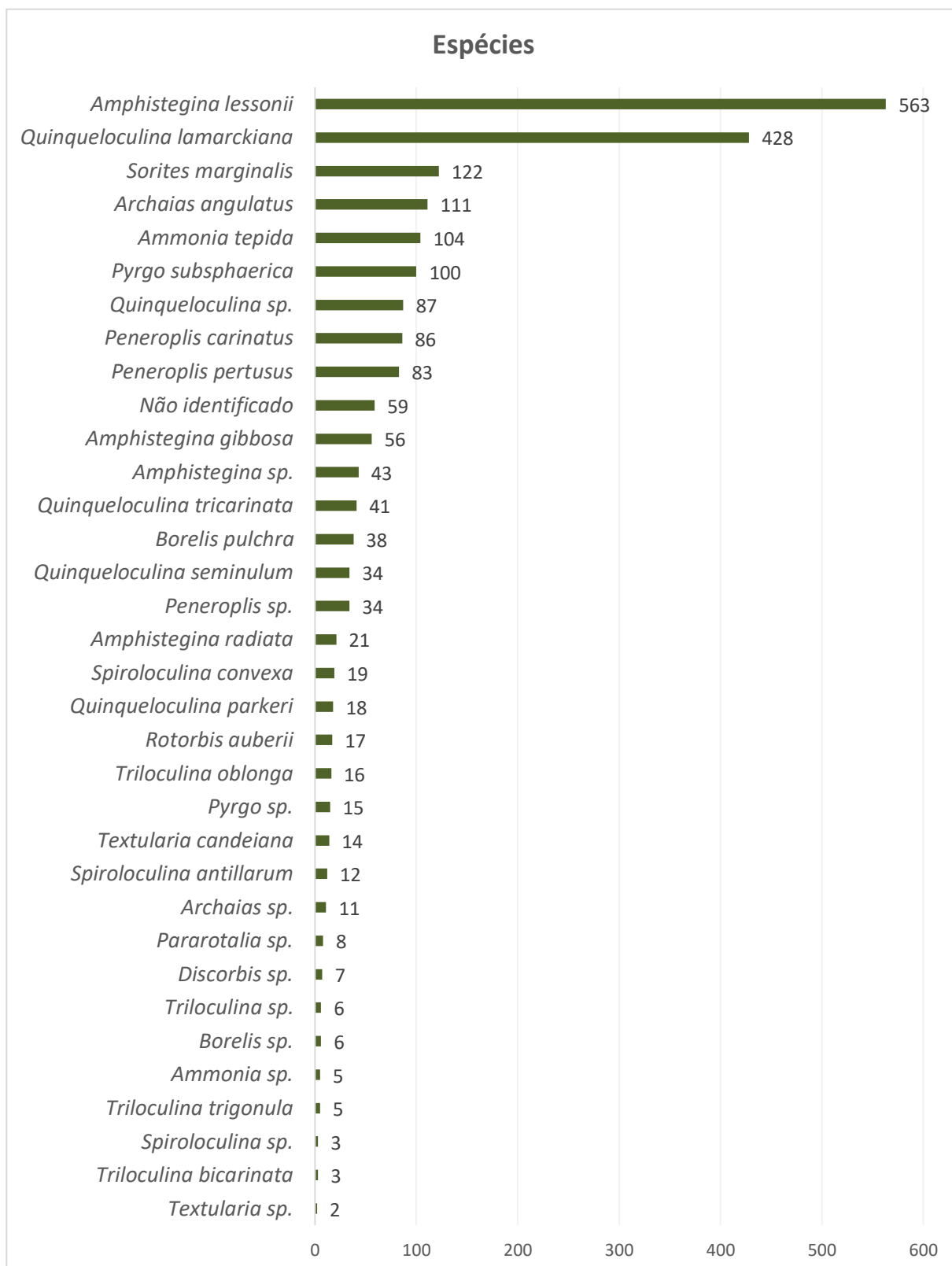


Figura 18 – Espécies de foraminíferos representados nas amostras

A análise das espécies de foraminíferos revelou uma predominância significativa de *Amphistegina lessonii*, com **563** espécimes, seguida por *Quinqueloculina lamarckiana*, com **428** indivíduos. Essas duas espécies juntas representam uma parcela substancial da comunidade estudada (46%). Outras espécies com abundância notável incluem *Sorites marginalis* (**122** espécimes), *Archaias angulatus* (**111**) e *Ammonia tepida* (**104**), indicando sua relevância ecológica na região.

O termo **sp.** indica que não foi possível a identificação segura e foi utilizado para uma espécie indefinida dentro de um determinado gênero. Além disso, a presença de 59 espécimes não identificados destaca a necessidade de análises taxonômicas mais detalhadas para uma compreensão completa da diversidade local.



Figura 19 – Fotomicrografias com a câmera AxioCam MRc 5 acoplada à lupa Zeiss Discovery V12

1. *Spiroloculina convexa* escurecida; 2. *Spiroloculina convexa* com dissolução; 3. *Spiroloculina convexa* 4. *Archaias angulatus* amarelada; 5. *Quinqueloculina lamarckiana*; 6. *Quinqueloculina lamarckiana* amarelada

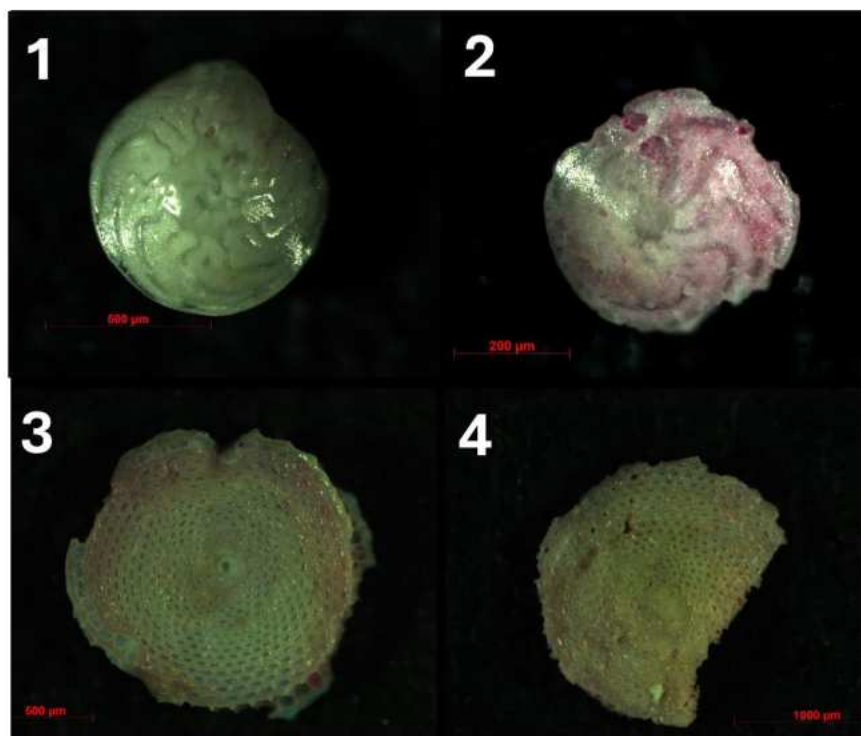


Figura 20 – Fotomicrografias com a câmera AxioCam MRc 5 acoplada à lupa Zeiss Discovery V12
1. *Amphistegina lessonii*; 2. *Amphistegina lessonii* com dissolução; 3. *Sorites marginalis*; 4. *Sorites marginalis* fragmentado

5.3. Tafonomia

A análise tafonômica revelou a ocorrência de 689 eventos, correspondendo a 32% dos espécimes examinados. Dentre os processos identificados, a dissolução foi o mais prevalente, representando 17,4% dos casos, seguida pela fragmentação com 11,2%. Outros processos observados incluíram bioerosão (1,5%), incrustação (0,9%) e deformação (0,7%) (Figuras 21, 22 e 23)

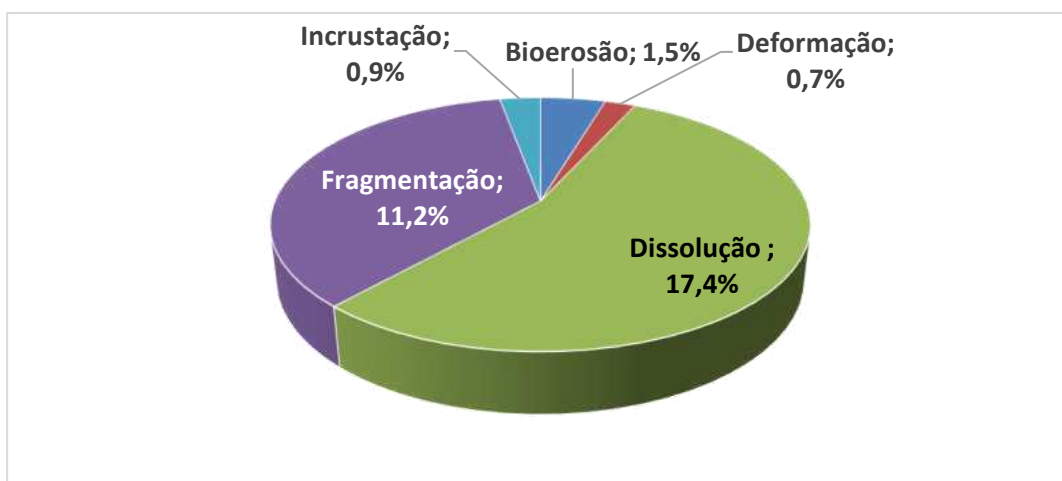


Figura 21 – Distribuição dos padrões tafonômicos observados em amostras analisadas

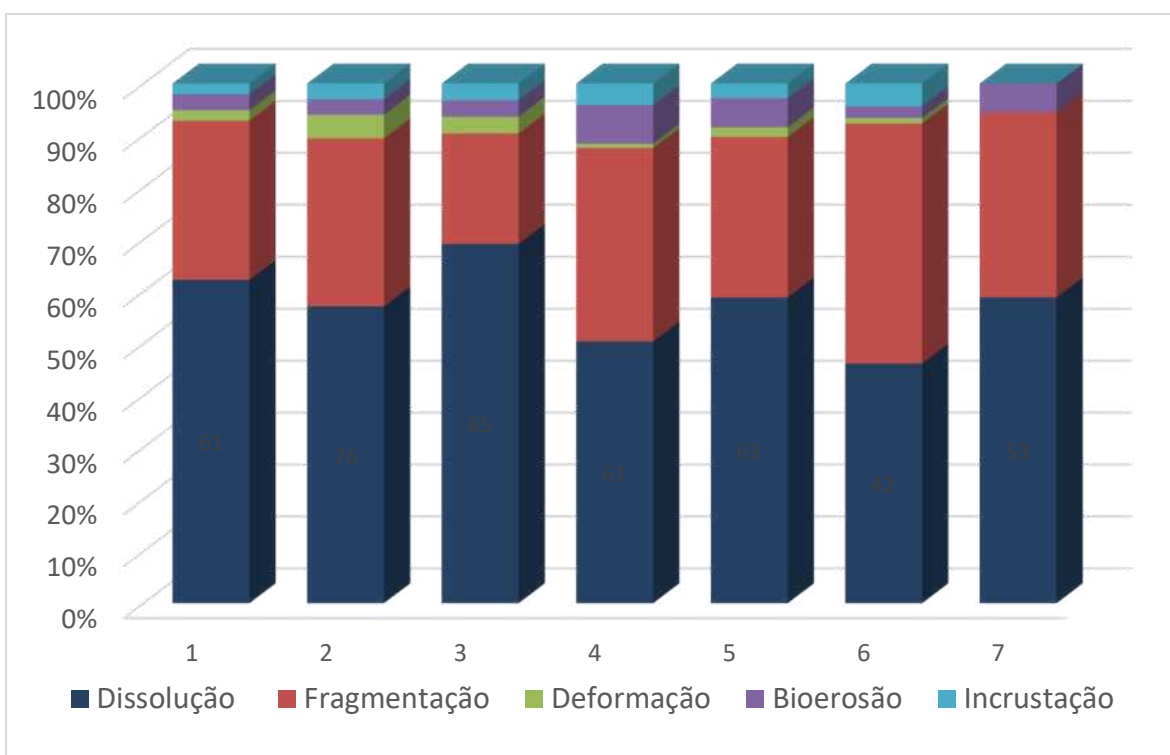


Figura 22 – Gráfico mostrando a porcentagem tafonômica encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo

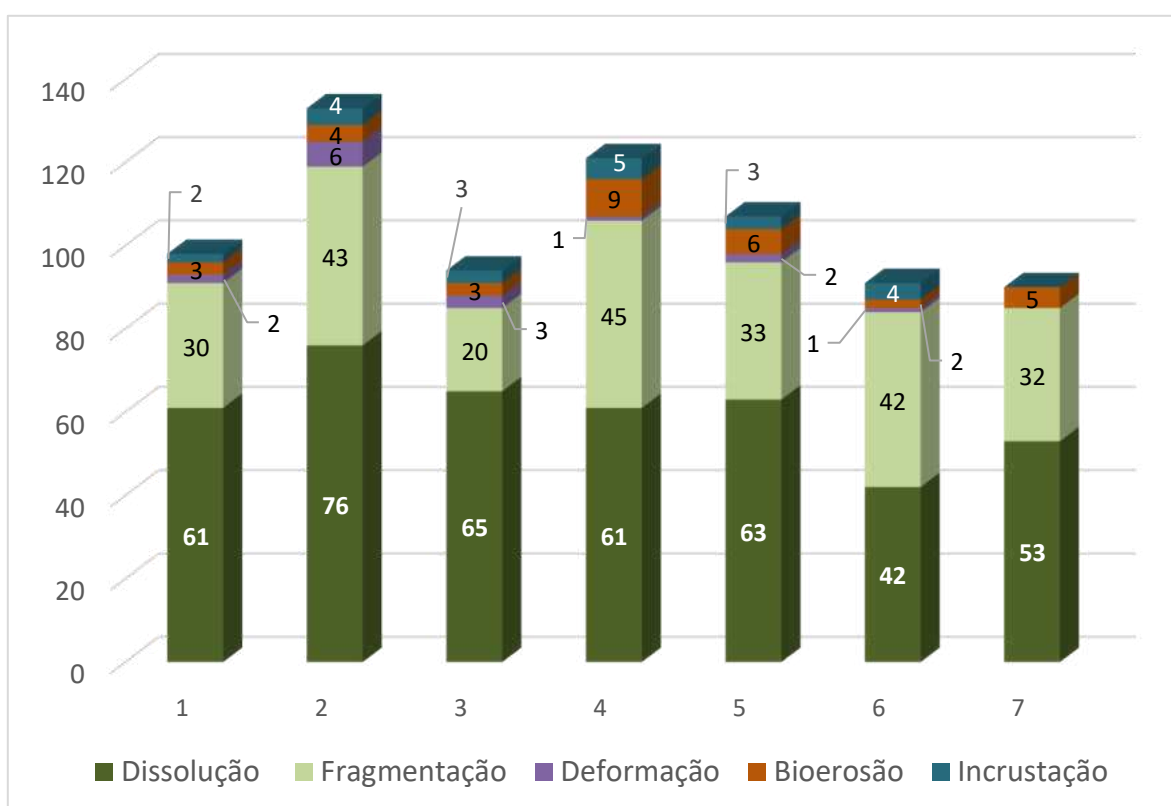


Figura 23 – Gráfico mostrando a quantidade de padrões tafonômicos encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo.

5.4. COLORAÇÃO

A análise das tecas revelou 490 ocorrências de alteração de cor, correspondendo a 23% dos espécimes examinados. Dentre essas, 11% apresentaram coloração corada, 7% escurecida e 5% amarelada, sendo a categoria 'corados' a mais frequente entre as amostras (Figuras 24, 25 e 26).

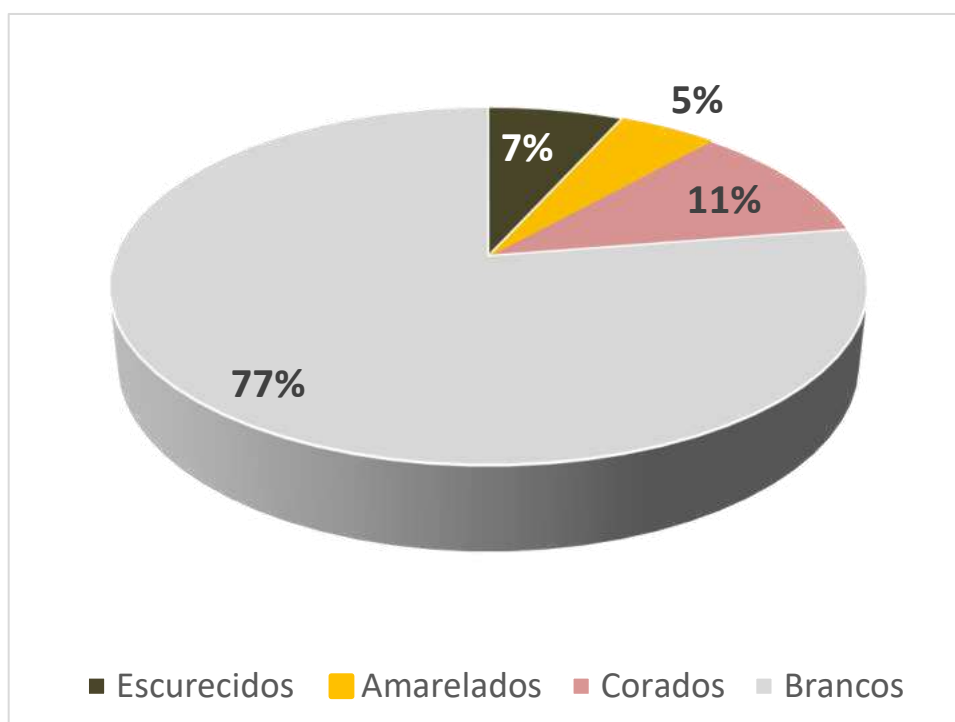


Figura 24 – Distribuição das alterações de cor observadas nas amostras

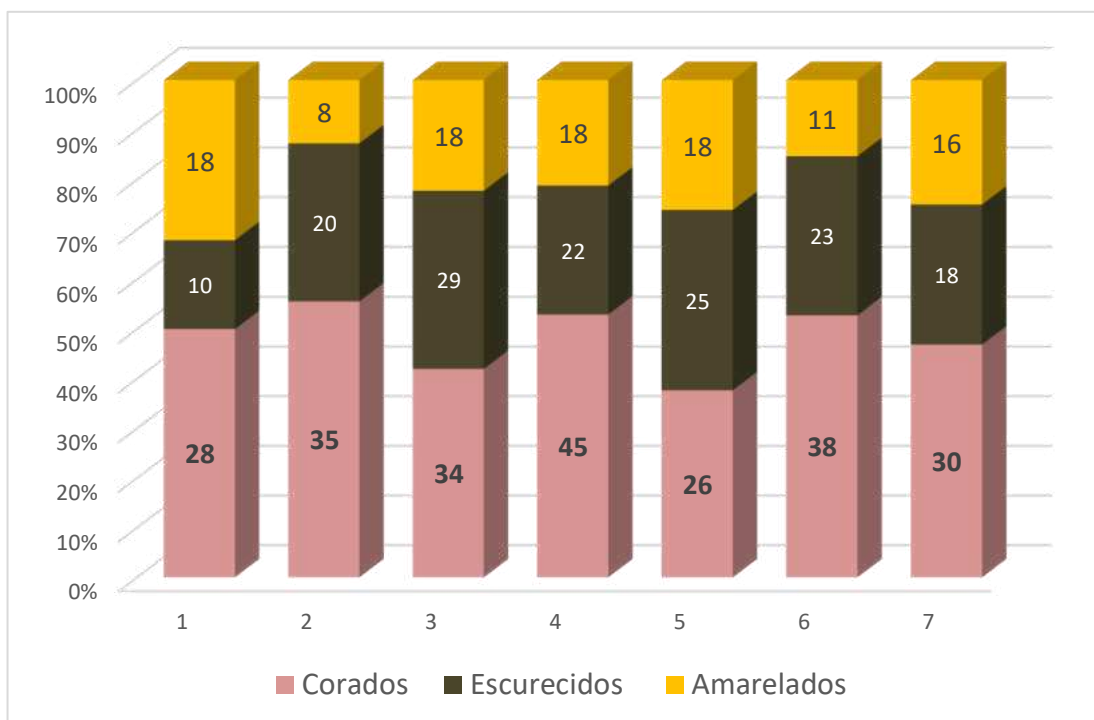


Figura 25 – Proporção entre as alterações de cor encontrada nos foraminíferos bentônicos, por amostra do estudo

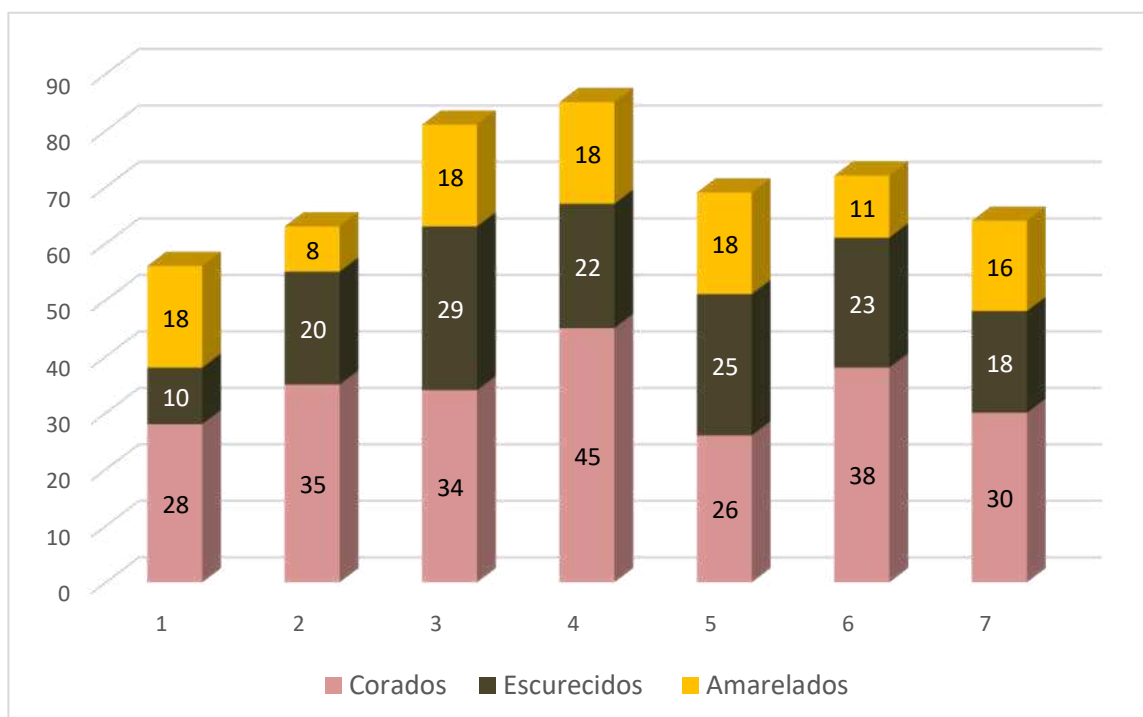


Figura 26 – Total de foraminíferos com alterações de cor, por amostra do estudo

5.5. Índices Ecológicos

5.5.1. Riqueza (S)

Foram encontrados **34** espécies, sendo que dentro desse valor estão **11** espécies que não foram identificadas. Desta maneira, o valor total da Riqueza pode estar subestimado, pois espécies não identificadas ou agrupadas podem ocultar a verdadeira diversidade taxonômica. Por esse motivo, a riqueza estimada deve ser reportada como "mínima", reconhecendo a possibilidade de uma biodiversidade maior do que a calculada (Figuras 27 e 28)

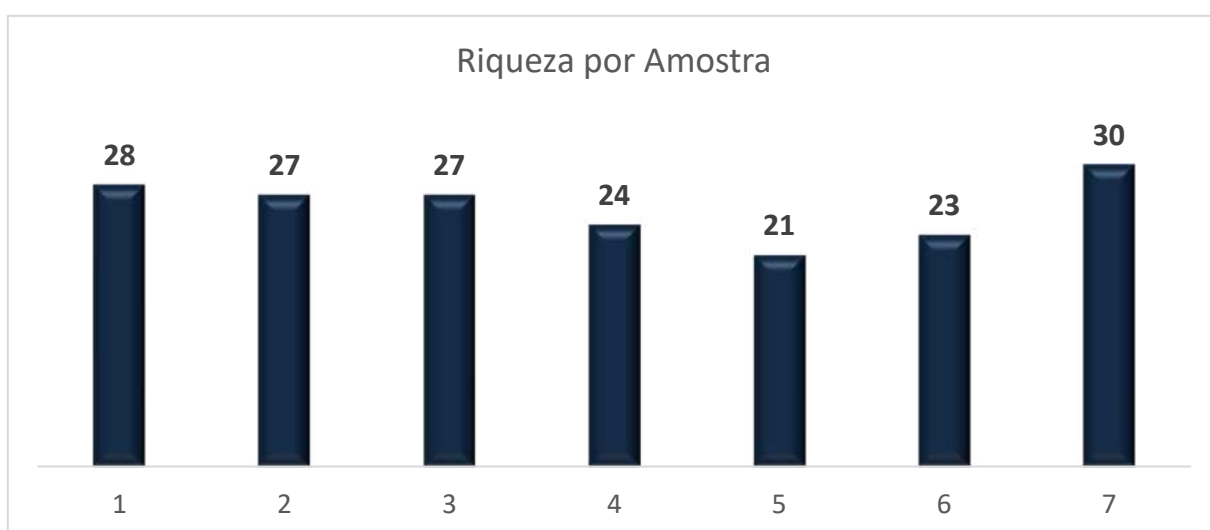


Figura 27 – Riqueza total por amostra



Figura 28 – Número de espécies não identificadas por amostra

O gênero *Quinqueloculina* apresentou o maior número de espécies identificadas, com 4 ao todo: *Quinqueloculina lamarckiana*, *Q. parkeri*, *Q. seminulum* e *Q. tricarinata*. No gênero *Amphistegina*, o mais abundante no estudo, três foram as espécies individualizadas: *Amphistegina gibbosa*, *A. lessonii* e *A. radiata*. As amostras de um modo geral apresentaram um número bastante similar em relação à Riqueza, com a amostra 7 apresentando o maior número de espécies, **30** a todo, e a amostra 5 o menor valor de Riqueza, **21**.

Em relação à abundância relativa, duas espécies se destacaram, representando juntas **45,5%** do total de indivíduos triados: *Amphistegina lessonii*, com **25,9%**, e *Quinqueloculina lamarckiana*, com **19,6%**.

5.5.2. Índice de Shannon (H')

O Índice de Shannon considerando-se o conjunto total de amostras apresentou um valor de **2,64** (Tabela 2).

Amostra	H'
1	2,55
2	2,34
3	2,54
4	2,41
5	2,29
6	2,49
7	2,84

Tabela 2 – Índice de Shannon por amostra

5.5.3. Equitatividade de Pielou (J')

A Equitatividade de Pielou (J') calculada para o conjunto completo de amostras resultou em um valor de **0,81** (Tabela 3).

Amostra	J'
1	0,77
2	0,71
3	0,77
4	0,76
5	0,75
6	0,79
7	0,83

Tabela 3 – Equitatividade de Pielou (J') por amostra

5.5.4. Índice de Dominância de Simpson (D)

O Índice de Dominância de Simpson (D) considerando-se o conjunto total de amostras apresentou um valor de **12,4%** (Tabela 4).

Amostra	D
1	11,1%
2	16,8%
3	13,0%
4	15,0%
5	17,3%
6	13,1%
7	8,7%

Tabela 4 – Índice de Dominância de Simpson (D) por amostra

5.5.5. Comparação dos Índices por Amostra

Relação entre os índices de diversidade e a riqueza para cada uma das amostras (Figura 29):

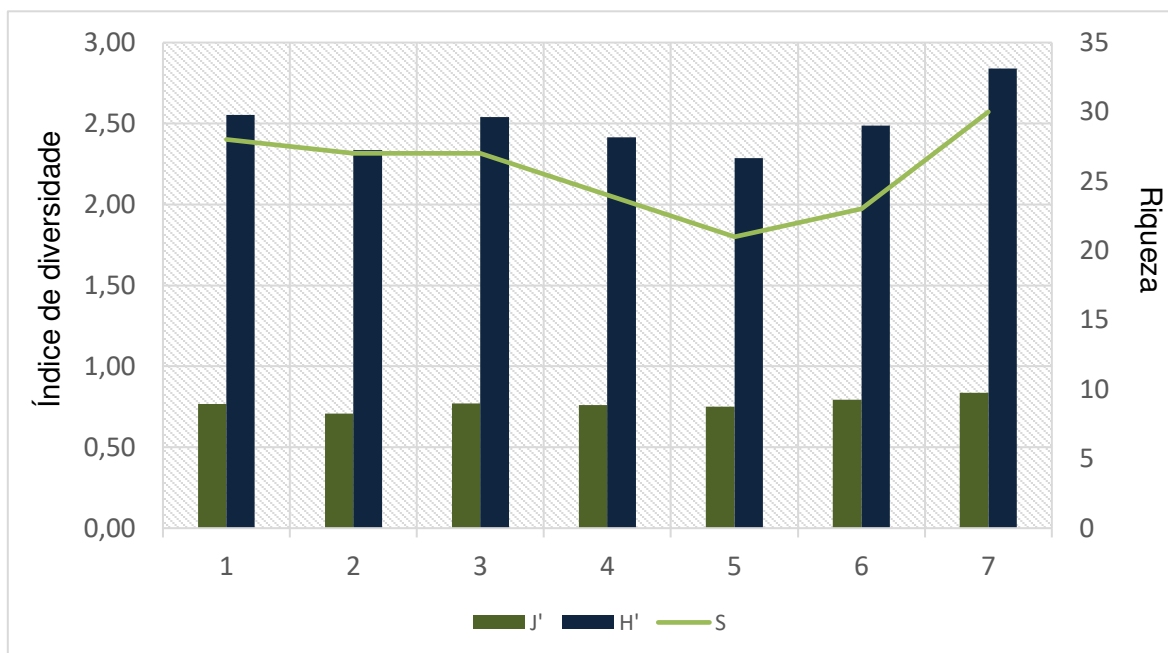


Figura 29 – Relação entre o total de indivíduos, diversidade e equitatividade em cada uma das amostras

5.5.6. FORAM Index (FI)

O Foram Index (FI) calculado para o conjunto completo de amostras resultou em um valor de **5,8** (Tabela 5).

Amostra	FI
1	6,2
2	6,2
3	5,6
4	5,6
5	6,0
6	5,9
7	5,7

Tabela 5 – Índice FORAM Index (FI) por amostra

6. DISCUSSÃO

6.1. Assembleia de Foraminíferos

A análise da assembleia de foraminíferos bentônicos nos parrachos do Rio do Fogo revelou uma predominância de espécies típicas de ambientes recifais, como *Amphistegina lessonii*, *Quinqueloculina lamarckiana*, *Sorites marginalis*, *Archaias angulatus* (Vilella et al. 2019; Andrade, 1997; Batista et al. 2007). A espécie *Amphistegina lessonii*, frequentemente encontrada em ambientes recifais e sedimentos de areia grossa, foi a mais abundante no estudo. Sua distribuição é restrita a profundidades de até 55 metros, devido à associação com algas marinhas simbiotes que necessitam de radiação solar vermelha para fotossíntese. A predominância dessa espécie indica condições de águas quentes e rasas (Batista et al. 2007).

Segundo Batista et al. (2007), a dominância de tecas de tamanho médio e a presença de várias tecas grandes, aliadas à escassez de tecas pequenas, sugerem transporte e seleção de partículas, favorecendo a acumulação de tecas maiores e mais robustas, enquanto as menores são removidas ou destruídas. No entanto devemos considerar que um ecossistema recifal propicia o desenvolvimento de tecas grandes, devido ao ambiente com maior conteúdo em carbonatos. Além disso, essas tecas maiores podem ter sido transportadas do topo do recife até o local de coleta das amostras, pela ação de ondas e gravidade.

A análise das amostras revelou uma alta similaridade na composição de espécies de foraminíferos. Essa uniformidade pode ser atribuída ao fato de as amostras terem sido coletadas em um mesmo ambiente, e em locais próximos entre si. A proximidade geográfica e a homogeneidade das condições ambientais, como salinidade, temperatura e tipo de substrato, contribuem para a presença de comunidades de foraminíferos semelhantes. Essa consistência na composição das espécies reforça a influência do ambiente local na distribuição e abundância dos foraminíferos, comprovando e respaldando os resultados encontrados na área de estudo.

6.2. Tafonomia e Coloração

6.2.1. Coloração

Os resultados obtidos nas sete amostras analisadas revelaram padrões na coloração das tecas de foraminíferos, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos processos sedimentares e das condições ambientais locais. Aproximadamente 10% dos espécimes apresentavam-se corados, isto é, vivos no momento da coleta, o que sugere que o volume de material clástico não é suficiente para soterrar rapidamente as tecas (Batista *et al.* 2007). Essa insuficiência resulta em uma baixa taxa de sedimentação, permitindo que as tecas permaneçam expostas à superfície por períodos prolongados. Essa condição é favorável ao desenvolvimento da assembleia atual de foraminíferos, indicando que o ambiente proporciona condições estáveis e adequadas para a sobrevivência e reprodução desses organismos.

Além disso, cerca de 7% das tecas estavam escurecidas (pretas ou marrons). A presença significativa de tecas pretas é indicativa de uma elevada taxa de transporte ou retrabalhamento do sedimento (Batista *et al.* 2007). Esse retrabalhamento pode ser atribuído à ação de organismos bioturbadores, que revolvem o sedimento e trazem grãos mais antigos e escurecidos para a zona oxidante. Essa atividade biológica intensa reflete um ecossistema dinâmico, onde a interação entre os organismos bentônicos e o substrato sedimentar é constante. A elevada taxa de retrabalhamento também pode estar associada a eventos hidrodinâmicos, como correntes e ondas, que contribuem para a redistribuição dos sedimentos. Já a presença de indivíduos marrons corresponde a uma frequente erosão da zona oxidante, fazendo com que os espécimes pretos sejam continuamente removidos para a superfície, em condições oxidantes. Essa característica está associada a uma intensa, porém não rápida, ação dos bioturbadores combinada com leves taxas de sedimentação. Isso reforça a interpretação de um ambiente sujeito a processos erosivos frequentes, considerável atividade bioturbadora e baixas taxas de sedimentação (Batista *et al.* 2007).

Além dos processos naturais, é importante considerar que o retrabalhamento observado nas amostras pode ser consequência do transporte das lanchas e a movimentação frequente de turistas, que contribuem significativamente para a perturbação do substrato sedimentar. O tráfego de embarcações propicia a suspensão e redistribuição dos sedimentos, aumentando a taxa de retrabalhamento e expondo

as tecas à zona oxidante de maneira mais contínua (Silva et al., 2020). Esse impacto antropogênico pode alterar a dinâmica sedimentar local e afetar a comunidade bentônica, incluindo a assembleia de foraminíferos.

Por fim, aproximadamente 5% das carapaças apresentavam-se amareladas. Tecas amareladas indicam uma exposição intermediária à oxidação. Um alto percentual de grãos amarelos sugere que os processos de retrabalhamento e bioturbação ocorrem em uma velocidade suficientemente baixa para permitir a oxidação gradual dos grãos marrons. Isso implica que, embora haja atividade bioturbadora, ela não é tão intensa a ponto de impedir a progressão dos processos oxidativos naturais. A presença de tecas amareladas pode indicar também variações na disponibilidade de oxigênio no sedimento, influenciando os processos de oxidação e a coloração resultante das tecas (Batista *et al.* 2007).

A combinação desses resultados aponta para um ambiente sedimentar caracterizado por uma baixa taxa de sedimentação e uma atividade bioturbadora moderada a intensa. A baixa sedimentação permite que as tecas permaneçam expostas na superfície sedimentar, enquanto a bioturbação e o retrabalhamento contínuo promovem a mistura dos sedimentos, influenciando a coloração das tecas devido à exposição a diferentes condições redox. Além dos processos biológicos naturais, as intervenções humanas podem desempenhar um papel sensível na dinâmica sedimentar dos parrachos, podendo afetar a saúde e a composição da assembleia local (Batista *et al.* 2007).

6.2.2. Tafonomia

Os resultados obtidos nas sete amostras revelaram uma significativa incidência de padrões tafonômicos, correspondendo a 32% dos espécimes analisados. Dentre esses, a dissolução foi o processo mais prevalente, representando 17% do total, seguida pela fragmentação, com 11%. Essa elevada frequência de foraminíferos dissolvidos e fragmentados pode ser indicativa de um ambiente de energia elevada. (Batista *et al.* 2008). Porém, essas tecas também podem ter sido transportadas do topo do recife, pela ação de ondas e gravidade.

A alta taxa de fragmentação pode também ser atribuída ao intenso movimento turístico na região, bem como ao revolvimento constante do sedimento causado pelo transporte das lanchas e pela movimentação dos turistas na área. Essas atividades

antropogênicas aumentam a energia do ambiente, promovendo a quebra mecânica das carapaças dos foraminíferos. A fragmentação elevada corrobora, portanto, uma possível influência direta das ações humanas na dinâmica sedimentar local.

A dissolução observada, embora geralmente associada a ambientes de baixa energia e sedimentos ricos em matéria orgânica, pode ser intensificada pela bioturbação presente nos Parrachos. Na dissolução a superfície da carapaça se torna opaca, áspera ou até perfurada. Os poros, quando presentes, tornam-se maiores, fazendo com que a teca se torne mais suscetível à fragmentação.

Além disso, a presença de bioerosão (1,5%) e incrustação (0,9%) nos espécimes analisados indica interação biológica direta com as carapaças, contribuindo para a alteração tafonômica observada. A deformação, embora menos expressiva (0,7%), pode refletir processos químicos e físicos que afetam a integridade das tecas.

Comparando os resultados obtidos no presente estudo, no Parracho de Rio do Fogo, com os dados do estudo nos Parrachos de Maracajaú, de 2008 (Batista et al., 2008), observam-se diferenças que podem refletir o impacto das atividades turísticas em cada região (Tabela 6). De fato, Maracajaú é conhecido por sua intensa atividade turística, o que contribui para o revolvimento constante do sedimento, aumentando a energia do ambiente e, conseqüentemente, pode aumentar a fragmentação e dissolução das carapaças de foraminíferos.

Em contrapartida, embora o Parracho de Rio do Fogo também apresente taxas relativamente elevadas de dissolução e fragmentação, esses valores são menores do que os registrados em Maracajaú. Isso sugere que o Rio do Fogo ainda não sofre o mesmo nível de impacto causado pelo turismo intenso. A menor pressão turística tende a permitir que os processos sedimentares naturais ocorram com menos interferência, preservando a integridade das carapaças de foraminíferos em maior medida. Além disso ao aprofundar a comparação entre o Parracho de Rio do Fogo e os parrachos de Maracajaú, percebe-se que a fragmentação das carapaças de foraminíferos bentônicos apresenta uma diferença mais significativa entre as duas regiões do que a dissolução. Enquanto os níveis de dissolução são cerca de 71% dos registrados em Maracajaú, indicando condições químicas comparáveis que promovem o enfraquecimento das carapaças, a taxa de fragmentação registrada em Rio do Fogo é cerca de apenas 54% da de Maracajaú. Isso pode sugerir que, apesar de a dissolução tornar as carapaças mais suscetíveis à quebra, a ação física adicional, como o pisoteio e o revolvimento do sedimento causado por atividades turísticas

intensas, tem o potencial de contribuir decisivamente para a fragmentação em Maracajaú, o que pode explicar a diferença em relação ao Parracho de Rio do Fogo.

Além disso, no estudo realizado em Maracajaú, não foram encontradas carapaças coradas com Rosa Bengala, ou seja, não foram identificados espécimes vivos no momento da coleta. Isso pode ser uma indicação da turbidez provocada pela movimentação antrópica na localidade, que estaria causando a morte gradual desse nicho ecológico (Batista et al., 2008). Em contrapartida, no Parracho de Rio do Fogo, cerca de 10% das carapaças estavam coradas, evidenciando a presença de organismos vivos e indicando uma melhor saúde ambiental no local.

Tafonomia	Maracajaú	Rio do Fogo
Bioerosão	1,3%	1,5%
Fragmentação	20,8%	11,2%
Incrustação	1,0%	0,9%
Dissolução	24,5%	17,4%
Deformado	0,2%	0,7%

Tabela 6 – Comparação dos resultados tafonômicos entre os parrachos de Maracajaú e Rio do Fogo

6.3. Índices Ecológicos

Os resultados obtidos nas lâminas analisadas revelaram uma associação de foraminíferos com riqueza de 34 espécies, um índice de diversidade de Shannon de 2,64 e uma equitatividade de Pielou de 0,81.

O índice de diversidade de Shannon (H') é uma medida amplamente utilizada em estudos ecológicos para quantificar a diversidade de espécies em uma comunidade. Um valor de 2,64 é indicativo de uma boa diversidade (Sen Gupta e Machain-Castillo, 1993), sugerindo que o ambiente suporta uma variedade significativa de espécies de foraminíferos. Essa diversidade é essencial para a estabilidade e resiliência do ecossistema, pois uma maior variedade de espécies pode contribuir para a realização de diferentes funções ecológicas e aumentar a capacidade do sistema de resistir a perturbações.

A equitatividade de Pielou (J'), com um valor de 0,81, indica uma distribuição relativamente uniforme dos indivíduos entre as espécies presentes. Valores próximos de 1 apontam para uma distribuição mais equitativa, enquanto valores próximos de 0 indicam dominância de poucas espécies. Uma equitatividade de 0,81 sugere que não há espécies extremamente dominantes, e que a maioria das espécies contribui de forma significativa para a composição da comunidade. Isso reforça a ideia de um ambiente saudável, onde as condições ecológicas permitem a coexistência equilibrada de múltiplas espécies.

Finalmente, O FORAM Index (FI), com um valor calculado de 5,88, também fornece informações valiosas sobre a qualidade ambiental, especialmente em relação à saúde de ecossistemas recifais. O FI é uma ferramenta desenvolvida para avaliar o potencial de habitats marinhos em suportar o crescimento e a manutenção de recifes de coral, baseando-se na composição das assembleias de foraminíferos. Valores de FI acima de 4 sugerem condições favoráveis para o desenvolvimento de recifes (Hallock *et al.*, 2003). Portanto, um FI de 5,88 indica que o ambiente estudado é propício ao crescimento de corais, refletindo boa qualidade da água, níveis adequados de salinidade e temperatura, além de baixa poluição.

Esses resultados, quando analisados em conjunto, permitem concluir que o Parracho de Rio do Fogo ainda apresenta certas condições ambientais saudáveis e adequadas para a manutenção da biodiversidade marinha, apesar do aumento do fluxo turístico na região. Além disso, é importante destacar que esses dados foram obtidos a partir de amostras coletadas em um único local específico no Parracho de Rio do Fogo, sem uma ampla distribuição geográfica das coletas. Mesmo com essa limitação espacial, os resultados revelaram uma comunidade de foraminíferos diversificada e equilibrada, indicando que o ambiente estudado se mantém relativamente saudável. A presença de bons índices de diversidade e equitatividade em um único ponto sugere que as condições ambientais favoráveis não são restritas apenas à área amostrada, mas possivelmente se estendem por uma porção maior do ecossistema local.

Adicionalmente, podemos comparar o FORAM Index (FI) obtido no Parracho de Rio do Fogo com os valores históricos registrados em Key Largo, Flórida (Hallock *et al.* 2003). (Figura 30). Os recifes em Key Largo na década de 1960, de acordo com os dados apresentados por Hallock e colaboradores (2003), apresentavam valores de FI semelhantes aos encontrados atualmente em Rio do Fogo, indicando ambientes

propícios ao crescimento de recifes. No entanto, nas décadas de 1980 e 1990, esses valores na Flórida já diminuíram para abaixo de 4, refletindo uma degradação ambiental e condições menos favoráveis ao desenvolvimento recifal. Essa comparação evidencia que o ambiente do Parracho de Rio do Fogo ainda mantém características de um ecossistema saudável, capaz de sustentar a biodiversidade e os processos ecológicos necessários para o crescimento de recifes, ressaltando a importância de medidas de conservação para garantir a continuidade dessas condições.

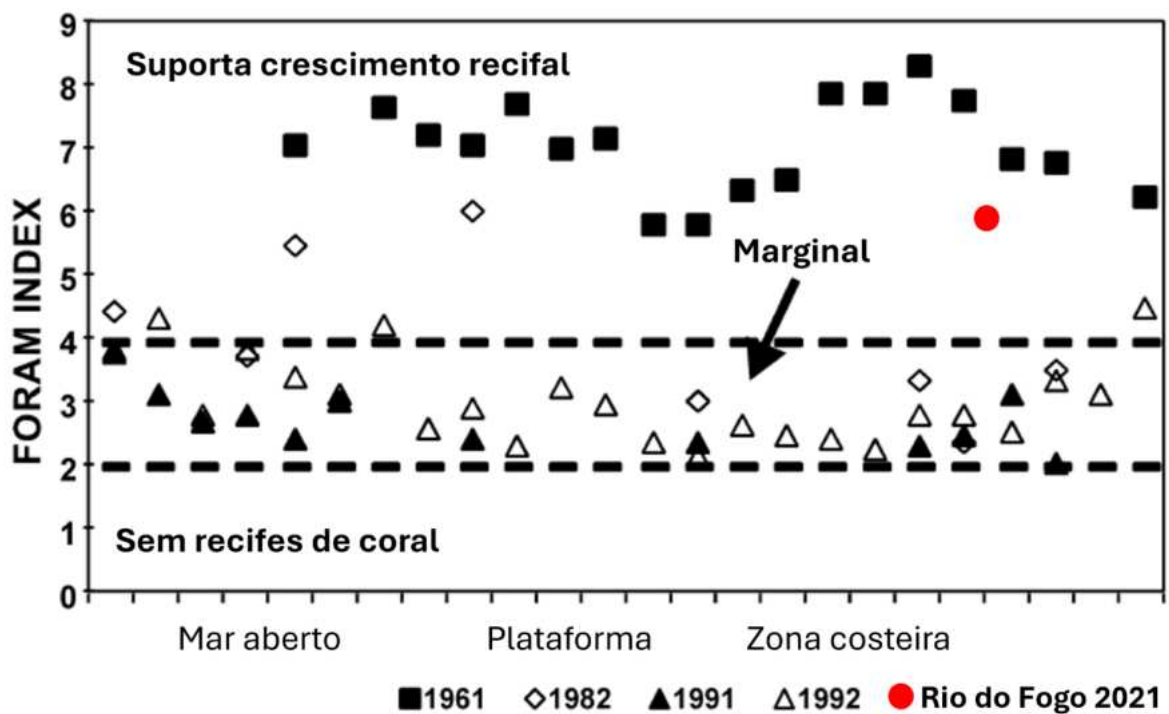


Figura 30 – Variabilidade espacial e temporal no Índice FORAM para amostras de Key Largo, Flórida (modificado de Hallock *et al.* 2003)

7. CONCLUSÃO

A caracterização das assembleias revelou uma riqueza de 34 espécies de foraminíferos bentônicos, predominando espécies típicas de ambientes recifais, de águas quentes, rasas, de baixas latitudes e salinidade normal, como *Amphistegina lessonii*, *Quinqueloculina lamarckiana*, *Sorites marginalis* e *Archaias angulatus*. O índice de diversidade de Shannon calculado no estudo foi de 2,64, indicando uma boa diversidade, enquanto obteve-se um valor de 0,81 para a equitatividade de Pielou, sugerindo uma distribuição relativamente uniforme dos indivíduos entre as espécies presentes. Esses resultados apontam para um ambiente saudável, capaz de suportar uma ampla variedade de espécies e contribuir para a estabilidade e resiliência do ecossistema.

O FORAM Index (FI) obtido foi de 5,88, indicando condições favoráveis para o crescimento de recifes. Esse valor é comparável aos registrados em locais como Key Largo, na Flórida, durante a década de 1960, antes de significativas degradações ambientais. A manutenção de um FI elevado reforça a ideia de que os parrachos de Rio do Fogo ainda preservam características ambientais propícias ao desenvolvimento e manutenção da biodiversidade marinha.

A análise tafonômica revelou uma incidência significativa de processos como dissolução e fragmentação, correspondendo a 17% e 11% dos espécimes analisados, respectivamente. Embora esses processos possam indicar um ambiente de energia elevada, a erosão e transporte das tecas de outros locais podem levar a esse mesmo resultado.

A comparação com os parrachos de Maracajaú mostrou que Rio do Fogo apresenta taxas menores de fragmentação e dissolução. Isso pode sugerir que o impacto das atividades turísticas na região é menos intenso, permitindo que os processos sedimentares naturais ocorram com menos interferência e preservando a integridade das carapaças de foraminíferos em maior medida. Porém se faz necessário ampliar o atual estudo, com a coleta de amostras em ambientes recifais próximos à área de coleta e que se mantenham sem a presença de atividade turística.

O resultado de aproximadamente 10% de carapaças coradas com Rosa Bengala indica a existência de espécimes vivos no momento da coleta, evidenciando a boa saúde ambiental do local. Em contraste, estudos realizados em Maracajaú não identificaram carapaças coradas, possivelmente devido à turbidez que pode ser

provocada pela movimentação antrópica intensa, o que à longo prazo tem o potencial de causar a morte gradual desse nicho ecológico.

Os padrões de coloração das tecas de foraminíferos sugerem uma baixa taxa de sedimentação e uma atividade bioturbadora moderada a intensa. A presença de tecas escurecidas e amareladas indica processos de retrabalhamento e bioturbação, influenciando a coloração devido à exposição a diferentes condições redox. Além dos processos naturais, considerou-se que o retrabalhamento observado pode ser consequência do revolvimento constante do sedimento devido às atividades antropogênicas, como o transporte de lanchas e a movimentação de turistas.

Apesar das possíveis influências antropogênicas identificadas, os resultados indicam que o ambiente dos parrachos de Rio do Fogo mantém-se relativamente saudável. A diversidade e a abundância de espécies, aliadas aos índices ecológicos calculados, sugerem que o ecossistema possui resiliência e capacidade de sustentar a biodiversidade marinha.

Adicionalmente, é fundamental reconhecer a importância da geodiversidade e do patrimônio geológico presentes nos parrachos de Rio do Fogo. No contexto deste trabalho, identificou-se características singulares do ambiente dos parrachos de Rio do Fogo, como a alta diversidade de foraminíferos bentônicos e a presença de espécies indicadoras de ambientes recifais saudáveis. O valor científico e ecológico desse patrimônio geológico é significativo, não apenas para estudos acadêmicos, mas também para a conservação da biodiversidade marinha.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que os parrachos de Rio do Fogo fazem parte da Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC), é oportuno sugerir boas práticas para a geoconservação do local. A geoconservação, neste contexto, envolve a aplicação de medidas práticas que visam proteger e conservar os elementos geológicos e biológicos identificados como valiosos e vulneráveis.

Algumas recomendações incluem:

- **Monitoramento Ambiental Contínuo:** Implementar programas de monitoramento regular da diversidade e distribuição dos foraminíferos bentônicos, bem como dos processos tafonômicos, para detectar alterações na saúde ambiental e responder prontamente a possíveis ameaças.
- **Controle do Fluxo Turístico:** Regular o número de visitantes e a frequência de atividades turísticas nos parrachos, de modo a minimizar o impacto antropogênico, especialmente o revolvimento e a turbidez do sedimento causada pelo tráfego de embarcações e pela movimentação dos turistas.
- **Educação Ambiental:** Promover ações educativas junto às comunidades locais, operadores turísticos e visitantes, enfatizando a importância da geodiversidade e do patrimônio geológico dos parrachos de Rio do Fogo. A conscientização pode incentivar comportamentos mais sustentáveis e responsáveis.
- **Zoneamento Ambiental:** Desenvolver e implementar um plano de zoneamento que identifique áreas de maior sensibilidade e vulnerabilidade, restringindo atividades potencialmente prejudiciais nesses locais e direcionando o turismo para áreas menos sensíveis.
- **Pesquisa Científica Colaborativa:** Incentivar parcerias entre universidades, instituições de pesquisa e órgãos governamentais para aprofundar o conhecimento sobre os parrachos e desenvolver estratégias de conservação

baseadas em evidências científicas.

Ao integrar esses aspectos ao contexto do trabalho, reforça-se a necessidade de ações concretas para a conservação do patrimônio geológico e da geodiversidade dos parrachos de Rio do Fogo. A identificação das principais características da área — singularidade, valor científico e ecológico, relevância e fragilidade — permite direcionar esforços para a aplicação de métodos de conservação adequados.

Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para a conservação e gestão ambiental do ecossistema recifal, evidenciando a necessidade de implementar boas práticas de geoconservação. A adoção dessas práticas é fundamental para assegurar a preservação dos recursos naturais, contribuindo para a continuidade dos processos ecológicos, a conservação da biodiversidade marinha e o desenvolvimento sustentável da região, em consonância com os objetivos da APARC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEY, W. H. Coral reef Ecosystems and Human Health: Biodiversity Counts! Ecosystem health, v. 6, p. 227-236, 2000.

ALMEIDA, Narelle Maia de; VITAL, Helenice; GOMES, Moab Praxedes. Morphology of submarine canyons along the continental margin of the Potiguar Basin, NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, [s. l.], v.68, p. 307-324, 2015.

ANDRADE E.J. 1997. Distribuição dos Foraminíferos Recentes na Transição Carbonato/Siliciclastos na região da Praia do Forte, litoral norte do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 111p.

ARAÚJO, P.; AMARAL, R.F. Mapping of coral reefs in the continental shelf of Brazilian Northeast through remote sensing. *Rev. Gestão Costeira Integr.* 2016,16,5–20 (PDF) Reconstructing High-Precision Coral Reef Geomorphology from Active Remote Sensing Datasets: A Robust Spatial Variability Modified Ordinary Kriging Method.

BATISTA, D. S. Foraminíferos bentônicos como bioindicadores ecológicos de ecossistemas recifais: Parracho de Maracajaú, RN, Brasil. Tese (Doutorado em Geologia)—UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO: 2008.

BATISTA, D. S., VILELA, C. G., and KOUTSOUKOS, E. A. M., 2007, Influência dos fatores ambientais na preservação o da microfauna de foraminíferos bentônicos no ambiente recifal dos Parrachos de Maracajaú, RN, Brasil: Anua´rio do Instituto de Geociências-UFRJ, v.30,p.92–103

BEHRENSMEYER, A.K. & KIDWELL, S.M. 1985. Taphonomy's contributions to paleobiology. *Paleobiology*, 11: 105-107.

BEZERRA, F.H.R.; BARRETO, A.M.F. & SUGUIO, K. 2003. Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. *Marine Geology*, 196: 73- 89

CARCAVILLA Urquí, J. López Martínez y J.J. Durán Valsero; Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos / L., eds.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2007

CENDRERO, A. El patrimonio geológico. Ideas para su protección, conservación y utilización. In: MOPTMA. El Patrimonio Geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1996. p. 17-38

CINNER, Joshua E. et al. Coral reefs and people in a high-CO₂ world: where can science make a difference to people? PLOS ONE, v. 11, n. 11, e0164699, 2016.

CORREIA, M.D. & SOVIERZOSKI, H.H. 2005. Ecossistemas Marinhos: recifes, praias e manguezais. Maceió: EDUFAL, 55p.

CUSHMAN, J. A. 1931. The foraminifera of the Atlantic Ocean. United States National Museum, Washington, D.C., Part.8. – Bull. 104: 1-179.

CUSHMAN, J. A. 1939. A monograph of the foraminiferal family Nonionidae. Geological Survey. Prof. Paper US 191.

GASPARINI, S.P; Vilela, C.G.; MASLIN, M. Paleoenvironmental characterisation of the Campos Basin slope (SE Brazil) in front of Cape São Tomé based on benthic foraminiferal biofacies succession since MIS 5. QUATERNARY INTERNATIONAL, v. 709, p. 29-42, 2024.

GRAY, M. 2004. Geodiversity. Valuing and conserving abiotic nature. John Wiley & Sons. West Sussex. 434 pp.

HALLOCK, P.; TALGE, H. K.; COCKEY, E. M.; MULLER, R. G. A new disease in reef-dwelling Foraminifera; implications for coastal sedimentation. Journal of Foraminiferal Research 1995; 25 (3): 280–286.

HALLOCK, P., LIDZ, B. H., COCKEY-BURKHARD, E. M., and DONNELLY, K. B., 2003, Foraminifera as bioindicators in coral reef assessment and monitoring: The FoRAM Index: Environmental Monitoring and Assessment, v. 81, p. 221–238.

LINK, Luciana de Oliveira (ed.). Plano de manejo: Área de proteção Ambiental dos Recifes de Corais. Natal: Oceanica, 2010. 583 p.

LOEBLICH, A. R. e TAPPAN, H. 1988. Foraminiferal genera and their classification. – Van Nostrand Reinhold Ed.

MAGURRAN, A. E. Measuring Biological Diversity. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2004.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil Situação Atual e Perspectivas. Brasília - DF: Ministério Do Meio Ambiente – MMA, 2006. Disponível em: <https://repositorio.icmbio.gov.br/bitstream/cecav/1504/1/Monitoramento_dos_Recifes_de_Coral_do_Brasil_Livro.pdf>.

PESSOA-NETO, O. C., SOARES, U. M., SILVA, J. G. F., ROESNER, E. H., FLORENCIO, C. P., SOUZA, C. A. V. (2007). Bacia Potiguar. Bol. Geociências. Petrobras 15, 357–369

PORTELLA Y. A.; FABIANOVICZ R. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Sumário geológico e de dados da Bacia Potiguar, 2017

ROSSI, J.-P. 2011. rich: an R package to analyse species richness. Diversity, 3: 112–120. <https://doi.org/10.3390/d3010112>.

SILVA, J. P., SANTOS, M. R., & OLIVEIRA, L. F. (2020). Impactos das atividades turísticas na morfologia sedimentar de áreas costeiras. Revista Brasileira de Geografia, 75(3), 456-470.

VILELA, C. G.; ÁZARO, A. S.; AMADO FILHO, G. Macroforaminíferos em rodolitos na Cadeia Vitória-Trindade, Atlântico Sul, margem leste brasileira. *Geociências*, v. 38, n. 3, p. 787-794, 2019.

VILELA, C.G. Microfósseis – Foraminíferos In: *Paleontologia volume 2 – Microfósseis e Paleoinvertebrados*. Carvalho, Souza, I. (3ª Ed.). Cap. 3 –. P. 53-69 . Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2011.

WANDERLEY, M. D.; MARIA, A. Estudo preliminar dos foraminíferos bentônicos da região Maxaranguape - litoral oriental do Rio Grande do Norte. *Revista Caatinga*, v. 7, n. 1, p. 353–353, 2014.

WORMS Editorial Board (2024). *World Register of Marine Species*. Disponível em <https://www.marinespecies.org> at VLIZ. Acessado em 2024-11-06. doi:10.14284/170