

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta dissertação será disponibilizado a partir de DD/MM/AAAA.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS *CAMPUS* DE RIO CLARO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

**BIVALVES BAKEVELLIIDAE DA FORMAÇÃO ROMUALDO (ANDAR
ALAGOAS, CRETÁCEO INFERIOR), BACIA DO ARARIPE, NE
BRASIL: SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL E
PALEOGEOGRÁFICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARIZA GOMES RODRIGUES

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELLO GUIMARÃES SIMÕES
CO-ORIENTADORA: DRA. SUZANA APARECIDA MATOS DA SILVA

Rio Claro - SP

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

MARIZA GOMES RODRIGUES

**BIVALVES BAKEVELLIIDAE DA FORMAÇÃO ROMUALDO (ANDAR
ALAGOAS, CRETÁCEO INFERIOR), BACIA DO ARARIPE, NE
BRASIL: SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL E
PALEOGEOGRÁFICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões

Co-orientadora: Dra. Suzana Aparecida Matos da Silva

Rio Claro – SP

2020

R696b

Rodrigues, Mariza Gomes

Bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo (Andar Alagoas, Cretáceo Inferior), Bacia do Araripe, NE Brasil: significado paleoambiental e paleogeográfico / Mariza Gomes Rodrigues. -- Rio Claro, 2020

128 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcello Guimarães Simões

Coorientadora: Suzana Aparecida Matos

1. Sistemática. 2. Bivalves pteriomorfos. 3. Aptiano. 4. Grupo Santana. 5. Tafonomia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARIZA GOMES RODRIGUES

**BIVALVES BAKEVELLIIDAE DA FORMAÇÃO ROMUALDO (ANDAR
ALAGOAS, CRETÁCEO INFERIOR), BÁCIA DO ARARIPE, NE
BRASIL: SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL E
PALEOGEOGRÁFICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões

Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Prof. Dr. Luiz Eduardo Anelli

Conceito: Aprovada

Rio Claro – SP

15 de Maio de 2020

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões (IBB/Unesp), pelas sugestões, discussões, paciência e oportunidade de trabalhar com o material da Bacia do Araripe. Obrigada por todos os ensinamentos compartilhados, sabedoria transmitida e confiança a mim depositados;

À minha co-orientadora Dra. Suzana Aparecida Matos da Silva, pela paciência, auxílio nas descrições, interpretações e discussões, por estar disposta a tirar dúvidas todos os dias. Obrigada pela amizade e apoio;

Ao meu companheiro da vida, Filipe Giovanini Varejão, por ter me incentivado em tudo desde o início. Pelas infinitas discussões sobre o tema da minha dissertação, pelo auxílio em trabalhos de campo e interpretações. Por tornar os meus dias mais leves e pelo amor incondicional;

Ao Prof. Franz T. Fürsich (Friedrich-Alexander-Universität) pelas sugestões e auxílio direto na problemática envolvida na presente dissertação;

Ao Prof. Lucas V. Warren (IGCE/UNESP), pelas discussões, auxílio nos trabalhos de campo, por me convidar para participar de suas aulas de campo nas disciplinas da graduação, pela amizade;

Ao Prof. Dr. Mario Luis Assine (IGCE/UNESP) pelas discussões e ensinamentos, por ter me dado a oportunidade de participar do Projeto “Relações entre Tectônica e Sedimentação em Bacias do Interior do Nordeste do Brasil”, pela amizade;

Aos professores que participaram da minha banca de qualificação, Profa. Dra. Jacqueline Neves (UTFPR) e Prof. Dr. Mario Luis Assine pela disponibilidade, pelas discussões e sugestões;

Aos amigos e colegas do LEQ da UNESP/Rio Claro, Amanda Catharina, Milena Rosa, Paloma Lorenso e Patrícia Mescolotti e do Lab. de Paleozoologia Evolutiva da UNESP/Botucatu, João Bondioli, Hugo Queiroz, Talita Souza, Victor Silva e Vitor Guerrini. Obrigada pelas conversas, discussões e pelos cafés. E aos ex-integrantes do LEQ, Michele Custódio e Eder Merino, por sempre estarem dispostos a ajudar;

Ao colega Lucas Inglez, por ter auxiliado a polir as amostras destinadas a análise tafonômica;

Ao técnico Junior do Laboratório de Laminação da Unesp/Rio Claro pela assistência e atenção;

Aos secretários e funcionários do IGCE/UNESP e IBB/UNESP, em especial à Rosângela, Lauren, Rosana (secretária da Fapesp) e Rose. Por auxiliarem sempre de forma solícita, na resolução dos problemas burocráticos;

Aos meus pais Izabel e Mário e meu irmão Matheus, pelo amor, apoio e incentivo aos meus estudos;

Ao Laboratório de Estudos do Quaternário (Unesp/Rio Claro) e Laboratório de Paleozoologia Evolutiva (Unesp/Botucatu), pelo uso de sua infraestrutura;

Ao UNESPetro e ao Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM), por terem disponibilizado os laboratórios de microscopia para a realização das descrições das lâminas petrográficas;

Ao Programa de Geociências e Meio Ambiente IGCE/UNESP, pelo apoio acadêmico e financeiro indispensáveis à realização desta Dissertação de Mestrado;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento parcial da pesquisa, na forma de Bolsa de Mestrado (Processo FAPESP nº 2018/01750-7);

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001;

Por fim, agradeço ao apoio financeiro também fornecido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; 304800/2017-1) e Petrobras/SIGITEC (2014/00519-9).

RESUMO

Bakevelliidae (Bivalvia, Pterioidea) são bivalves extintos, marinhos, de epifauna a semi-infauna, bissados, suspensívoros, com pelo menos 20 gêneros descritos e inúmeras ocorrências em todo o mundo. Eles prosperaram do Paleozoico tardio ao Eoceno, atingindo máxima diversidade durante o Mesozoico (principalmente no Jurássico Inferior e Médio). Eles também foram abundantes e bem distribuídos em sucessões sedimentares cretáceas, como àquelas das bacias do Araripe e Sergipe-Alagoas, ocorrendo também de forma pontual na bacia de Pernambuco-Paraíba, no nordeste do Brasil. Neste documento, novos Bakevelliidae aptianos (Cretáceo Inferior) são descritos para a Formação Romualdo, Grupo Santana, Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. A análise está fundamentada no exame detalhado de 361 espécimes, provenientes do terço superior da Formação Romualdo, principalmente das seções geológicas nas bordas sudoeste e sudeste da bacia, tendo sido, porém, registrados em toda a Bacia do Araripe. Juntamente com outros membros conhecidos da família Bakevelliidae, já registrados na Formação Romualdo (i.e., *Aguileria dissita*), os novos bivalves (*Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov. e Gen et sp. Indet.) indicam que a fauna de Bakevelliidae desta unidade foi mais diversa do que se imaginava anteriormente. Calcários ricos em conchas de Bakevelliidae, alguns com espécimes preservados *in situ*, estão restritos ao terço superior desta unidade, o mesmo intervalo estratigráfico contendo calcários com equinodermos, gastrópodes e estromatólitos. Esses bivalves pteriomorfos, portanto, são um testemunho do breve “Mar de Bakevelliidae” que inundou toda a Bacia do Araripe, durante o Aptiano. Análises paleoautoecológicas indicam que *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. era uma espécie de epifauna, que viveu em substratos bioclásticos e estáveis, enquanto *Aguileria romualdoensis* sp. nov. era uma forma semi-infaunal bissada, que colonizou sedimentos finos. Espécimes das três espécies de Bakevelliidae estudadas são encontrados juntos em uma dada concentração fóssil, mas apenas *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. é preservada *in situ*. Esta espécie é registrada, principalmente, em concentrações fósseis primariamente biogênicas, formando delgados depósitos de sufocamento. Notavelmente, *Aguileria romualdoensis* sp. nov. se assemelha a *A. renauxiana* da Formação Woodbine, Cenomaniano, Texas, EUA. Além disso, *Aguileria dissita* também é registrada na Formação Riachuelo, Aptiano tardio-Albiano, da Bacia de Sergipe-Alagoas. Juntamente com outros macroinvertebrados (i.e., gastrópodes, equinodermos, bivalves), a fauna de Bakevelliidae da Formação Romualdo é fortemente biocorrelata à da Formação Riachuelo, suportando um cenário paleogeográfico em que águas marinhas inundaram a Bacia do Araripe advindas de

sudeste, provavelmente através das bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá. Finalmente, informações sedimentológicas, estratigráficas e paleontológicas indicam que o desaparecimento dos Bakevelliidae na Formação Romualdo está vinculado a continentalização da Bacia do Araripe.

Palavras-chaves: sistemática, bivalves pteriomorfos, aptiano, Grupo Santana, biocorrelação, tafonomia, mar epicontinental.

ABSTRACT

Bakevelliids (Bivalvia, Pterioidea) are extinct, marine, stationary epifaunal to semi-infaunal, suspension feeding bivalves with at least 20 described genera and numerous occurrences worldwide. They thrived from the Late Paleozoic to Eocene, reaching the maximum diversity during the Mesozoic (mainly Early and Middle Jurassic). They were also abundant and widespread in many Cretaceous sedimentary successions, as in the Araripe and Sergipe-Alagoas basins, also occurring occasionally in Pernambuco-Paraíba basin, in NE Brazil. In this document, new Aptian (Lower Cretaceous) bakevelliid bivalves are described for the Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin, northeastern Brazil. Analysis is based on the detailed examination of 361 specimens all from the upper third interval of the Romualdo Formation, mainly from geological sections in the southwestern and southeastern borders of the basin, but they were recorded in all four corners of the Araripe Basin. Together with the other known members of the family Bakevelliidae, already record in the unit (i.e., *Aguileria dissita*), the new bivalves (*Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov., and Gen et sp. indet.) indicate that the Romualdo bakevelliid fauna was more diverse than previously realized. Bakevelliid-rich carbonates, some with *in situ* specimens, are restrict to the upper third of this unit, the same stratigraphic interval yielding echinoderm-, gastropod- and stromatolite-bearing limestones. These pteriomorphian bivalves were widely distributed in the Romualdo Formation and are a testimony of the short-lived bakevelliid-sea that flooded the whole Araripe Basin, during the Aptian. Paleoautoecologic analysis indicate that *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. was an epifaunal, byssate species, living in bioclastic, stable substrates, whereas *Aguileria romualdoensis* sp. nov. was a semi-infaunal, byssate form. Specimens of the three studied bakevelliid species can be recorded all together in a given fossil concentration, but only *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. is found *in situ*. This species is found in primarily biogenic fossil concentrations forming thin obrution deposits. Notably, *Aguileria romualdoensis* sp. nov. close resembles *A. renauxiana* from the Cenomanian Woodbine Formation, Texas, US. In addition, *Aguileria dissita* is also recorded in the Late Aptian-Albian Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin. Together with other macroinvertebrates (i.e., gastropods, echinoderms, bivalves) the bakevelliid fauna of the Romualdo Formation can be biocorrelated tightly with that of the Riachuelo Formation, supporting a paleogeographic scenario with the marine waters flooding the Araripe Basin from the southeast, probably via Recôncavo-Tucano-Jatobá Basin system. Finally, sedimentologic, stratigraphic and

paleontological information indicate that the fate of the bakevelliids in the Romualdo Formation, is bound up with the onset of continentalization of the Araripe Basin.

Keywords: systematics, pteriomorphian bivalves, aptian, Santana Group, biocorrelation, taphonomy, epicontinental sea.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Problemática envolvida</i>	2
1.2 <i>Justificativas e Hipóteses</i>	3
2. OBJETIVOS	5
3. REGISTROS DE BAKEVELLIIDAE NO CRETÁCEO DO BRASIL	5
4. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA	10
5. MATERIAIS E MÉTODOS	14
5.1 <i>Levantamento de dados de campo</i>	14
5.2 <i>Atividades de laboratório</i>	15
5.2.1 <i>Seções polidas (Slab)</i>	15
5.2.2 <i>Análise petrográfica</i>	16
5.2.3 <i>Preparação e moldagem dos espécimes</i>	16
5.2.4 <i>Fotodocumentação</i>	17
5.2.5 <i>Elaboração de banco de dados</i>	17
5.2.6 <i>Ilustração</i>	17
5.2.7 <i>Análise taxonômica e paleoecológica</i>	18
5.2.8 <i>Análise tafonômica</i>	18
5.2.9 <i>Pesquisa bibliográfica</i>	18
6. RESULTADOS	18
6.1 <i>Descrição das Seções Sobradinho e Serra do Inácio</i>	19
6.1.1 <i>Seção de Sobradinho</i>	19
6.1.2 <i>Seção da Serra do Inácio</i>	22
6.2 <i>Caracterização das concentrações de Sobradinho</i>	23
6.2.1 <i>Microfácies carbonáticas</i>	23
6.2.2 <i>Associação de microfácies</i>	32
6.3 <i>Sistemática paleontológica</i>	37
6.3.1 <i>Novos bivalves pteriormorfos do Aptiano da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, e o breve “Mar de Bakevelliidae” do interior do nordeste do Brasil</i>	38
7. DISCUSSÃO	39
7.1 <i>Tafonomia e composição faunística</i>	39
7.2 <i>Gênese das concentrações bioclásticas</i>	40
7.2.1 <i>Trabalhos anteriores</i>	41
7.2.2 <i>Modelo deposicional</i>	42
7.3 <i>Paleoecologia</i>	48
8. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÊNDICE	59
<i>Short-lived “Bakevelliid-Sea” in the Aptian Romualdo Formation, Araripe Basin, Northeastern Brazil</i>	59
ANEXO	110
<i>Microbialite fields developed in a protected rocky coastline: The shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil)</i>	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 — Ocorrências de bivalves Bakevelliidae nas bacias sedimentares do nordeste brasileiro.....	6
Figura 2 — Mapa geológico da Bacia do Araripe com as localidades onde os fósseis estudados foram encontrados.....	11
Figura 3 — Diagrama idealizado mostrando a sequência deposicional da Formação Romualdo, na Bacia do Araripe.....	12
Figura 4 — Seções colunares da Formação Romualdo nas localidades de Serra do Inácio e Sobradinho, estados de Pernambuco e Ceará, respectivamente.....	21
Figura 5 — Fácies sedimentares das seções colunares de Sobradinho e Serra do Inácio.....	22
Figura 6 — <i>Mudstone</i> com ostracodes e <i>wackestone</i> a bivalves e gastrópodes.....	25
Figura 7 — <i>Packstone</i> a gastrópodes e bivalves.....	26
Figura 8 — <i>Grainstone</i> a gastrópodes e bivalves.....	28
Figura 9 — <i>Floatstone</i> a bivalves e gastrópodes e <i>rudstone</i> a bivalves e gastrópodes.....	29
Figura 10 — <i>Floatstone</i> a Bakevelliidae.....	31
Figura 11 — <i>Rudstone</i> a Bakevelliidae.....	32
Figura 12 — Seção colunar detalhada dos níveis carbonáticos contendo conchas de Bakevelliidae.....	33
Figura 13 — Associação de microfácies 1.....	34
Figura 14 — Associação de microfácies 2.....	35
Figura 15 — Associação de microfácies 3.....	35
Figura 16 — Associação de microfácies 4.....	36
Figura 17 — Associação de microfácies 5.....	36
Figura 18 — Associação de microfácies 6.....	37
Figura 19 — Variação nos atributos tafonômicos dos bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, Brasil.....	40
Figura 20 — Modelo mostrando os processos envolvidos na gênese das diferentes associações de microfácies, assim como os diferentes tipos de concentrações esqueléticas identificados.....	42
Figura 21 — <i>Araripevella musculosa</i> gen et sp. nov. preservada em posição de vida.....	46
Figura 22 — Modelo genético para origem das concentrações fossilíferas com Bakevelliidae da seção colunar da localidade de Sobradinho.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 — Registro histórico das espécies de Bakevelliidae encontradas nas bacias sedimentares interiores do nordeste brasileiro.....	9
Tabela 2 — Relação dos vários grupos de fósseis de importância cronoestratigráfica da Formação Romualdo.....	13

1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Araripe é mundialmente reconhecida por suas rochas cretáceas portadoras de abundantes fósseis (*Konzentrat-Lagerstätten*) ou com elementos espetacularmente bem preservados (*Konzervat-Lagerstätten*) (*sensu* Seilacher et al., 1985). A origem da bacia está relacionada ao desmantelamento do Gondwana e à abertura do Oceano Atlântico Sul, durante o Eocretáceo, intervalo onde estão registradas as primeiras ingressões marinhas no interior do nordeste brasileiro (Arai, 2016; Assine et al., 2016). Várias hipóteses e cenários paleogeográficos têm sido postulados para a origem e a direção das ingressões marinhas na Bacia do Araripe, com autores advogando por ingressões advindas de norte, via bacias de São Luís e Parnaíba, de noroeste, via Bacia Potiguar, bem como a partir do sul, cruzando os limites das bacias de Sergipe-Alagoas (veja discussão recente e referências em Arai, 2016; Assine et al., 2016).

Fundamentados em dados estruturais, estratigráficos e paleontológicos, Assine et al. (2016) propõem que, no Cretáceo Inferior, haveria um *seaway* entre as bacias do Araripe e Sergipe-Alagoas, com ingressão de águas marinhas de sul para norte, se aproveitando dos vales fluviais incisos desenvolvidos nas bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá (Varejão et al., 2016; Freitas et al., 2017). De fato, as paleocorrentes deduzidas das direções de mergulho de estratos cruzados de fácies sedimentares fluviais sotopostos (i.e., Formação Barbalha da Bacia do Araripe e Formação Marizal das bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá) indicam que a Bacia do Araripe integrava um sistema de paleodrenagem continental que fluía para sul, acompanhando os vales de direção N-S, possivelmente condicionados por subsidência relacionada à reativação de falhas de fase rifte das bacias da margem continental brasileira (Assine et al., 2016; Varejão et al., 2016; Freitas et al., 2017). Naturalmente, esses vales constituíram, posteriormente, caminho para a ingressão marinha neoptiana, que atingiu a Bacia do Araripe, situada ao norte, culminando com a deposição dos folhelhos marinhos da Formação Romualdo (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). Dessa forma, os depósitos e fósseis desta unidade são cruciais para as interpretações paleobiogeográficas. De fato, os dados disponíveis sugerem que: (i) haveria afinidade entre as faunas de invertebrados de unidades coevas da Bacia do Araripe (e.g., formações Crato e Romualdo), com as da Bacia de Sergipe (e.g., Formação Riachuelo) (vide, por exemplo, Pereira et al., 2015; White, 1887a); (ii) teria existido um *seaway* ou *corridor* entre ambas as bacias sedimentares (Martill, 1993; Assine et al., 2016), e (iii) a diversidade da fauna de invertebrados das formações Crato e Romualdo seria, em parte, resultante de elementos

imigrantes (cosmopolitas) e não apenas constituída por elementos que evoluíram *in situ* (endêmicos) na Bacia do Araripe (e.g., Silva et al., 2019).

Nesse contexto, os moluscos bivalves da Formação Romualdo, especialmente os Bakevelliidae, se destacam como elementos-chave para corroborar ou refutar as hipóteses paleogeográficas aventadas por autores tais como Assine et al. (2016), Varejão et al. (2016), Custódio et al. (2017), Freitas et al. (2017) e Fürsich et al. (2019). Os Bakevelliidae constituem uma família extinta (Carbonífero-Eoceno) de bivalves pterióides, marinhos ou de águas salobras, com ampla distribuição paleobiogeográfica. A família contém 24 gêneros (segundo o *The Paleobiology Database*, acessado em fevereiro de 2020), dos quais dois já foram mencionados para a Bacia do Araripe (e.g., *Aguileria dissita* e *Bakevella* sp.). A recente redescoberta de uma abundante malacofauna de Bakevelliidae na parte superior da Formação Romualdo, cuja afinidade parece estar relacionada a elementos coevos da Bacia de Sergipe (vide Pereira et al., 2015), abre a possibilidade para a validação dos modelos paleogeográficos mencionados acima, bem como discutir questões paleoambientais e paleoecológicas relevantes, no contexto da deposição do intervalo superior da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, onde esses bivalves são abundantes. Desse modo, as premissas citadas nos itens i a iii, constituem o cerne da pesquisa desenvolvida.

1.1 Problemática envolvida

Deve-se a Hartt (1870) o primeiro registro de bivalves fósseis na sucessão sedimentar cretácea da Bacia do Araripe. Desde então diversos artigos, dissertações e teses, sem contar uma infinidade de resumos em eventos científicos, trataram da presença de moluscos bivalves nas unidades Crato e Romualdo, Grupo Santana. Mabesoone & Tinoco (1973) sintetizaram as ocorrências de moluscos na Bacia do Araripe e compilações mais atualizadas aparecem em Sales (2005), Bruno & Hessel (2006), Martill et al. (2007) e Bruno (2009). Com exceção dessa última autora (vide discussão mais adiante) e de Pereira et al. (2015; 2018), nenhum dos estudos publicados desde 1870, tratando dos bivalves da Formação Romualdo, contém ilustrações, descrições formais e referências às instituições de repositório dos espécimes analisados (vide Bruno, 2009). Essa situação é inaceitável do ponto de vista científico, à luz do enorme conhecimento ocorrido nos últimos 30 anos em relação às ocorrências coevas de outras partes da América do Sul, especialmente da Argentina e Chile (vide Damborenea, 1987; Aberhan & Muster, 1997; Lazo, 2003). Em outras palavras, os bivalves da Formação Romualdo permanecem na sua maioria não estudados, especialmente do ponto de vista da sistemática da fauna, principalmente se considerarmos as normas e recomendações do *International Code of*

Zoological Nomenclature (ICZN, 1999). Em decorrência dessa situação, o conhecimento taxonômico dos bivalves cretáceos da Bacia do Araripe é ainda incipiente, sendo urgente estudos de sistemática paleontológica (vide Pereira et al., 2015), tafonomia e paleoecologia, os quais são básicos para as investigações com foco em biocorrelações, reconstruções paleogeográficas e paleoambientais. É neste contexto que a presente dissertação de mestrado está inserida.

1.2 Justificativas e Hipóteses

Nos últimos cinco anos, em decorrência de uma série de esforços de coleta no âmbito de projeto internacional financiado pelo CNPq (coordenado pelo Prof. Dr. Marcello Simões), concomitante aos financiados pela Petrobras-Fundunesp (coordenado pelo Prof. Dr. Mario Assine), várias seções colunares foram levantadas nas bordas leste e oeste na Bacia do Araripe, abrangendo, dentre outros, os depósitos cretáceos das formações Crato (Varejão, 2019) e Romualdo (Custódio, 2017; Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). Em decorrência, foi possível estabelecer com grande precisão a posição estratigráfica de muitas ocorrências de macroinvertebrados, especialmente Mollusca (Gastropoda e Bivalvia), Echinodermata e Crustacea (Decapoda), particularmente na Formação Romualdo (ver Fürsich et al., 2019). Esses grupos têm enorme potencial como indicadores paleoambientais, especialmente para a interpretação dos regimes de salinidade e oxigenação das águas de fundo, taxas de sedimentação e tipos de substrato (Holz & Simões, 2002). Uma das seções mais representativas da Formação Romualdo na borda leste da Bacia do Araripe está, conforme já mencionado acima, na localidade de Sobradinho, distrito de Jardim, Estado do Ceará (Figs. 1 e 2). No topo da sucessão sedimentar foram encontradas coquinas centimétricas, constituídas principalmente por conchas de bivalves Bakevelliidae, cujas espécies até então não haviam sido formalmente descritas (vide abaixo) para essa parte da Bacia do Araripe. Em decorrência da importância desses fósseis para as interpretações bioestratigráficas, paleogeográficas e paleoambientais, a presente dissertação de mestrado foca no estudo desse grupo de moluscos.

Na Formação Romualdo, bivalves Bakevelliidae foram previamente mencionados por Bruno (2009) e Pereira et al. (2015), nas bordas leste e oeste da bacia, respectivamente. Bruno (2009) apresenta um estudo taxonômico e paleoecológico detalhado dos Bakevelliidae provenientes da localidade de Sobradinho, cuja presença foi revelada por uma escavação aberta por Sales (2005). Bruno (2009) cita que o artigo “*Pseudoptera beurleni, a new species of Bakevelliidae (Bivalvia) from the Santana Formation (Albian?), northeastern Brazil, and its palaeontological implications*” foi submetido ao periódico *Cretaceous Research*, em data

anterior a 24 de julho de 2009. A busca detalhada na literatura, bem como no CV-Lattes das autoras (Bruno, A.P.S e Hessel, M.H.R.), em fevereiro de 2020, revelou que, passados quase 11 anos da submissão do artigo, esse ainda não foi formalmente publicado.

É importante ressaltar ainda que para o ICZN, táxons publicados em dissertações ou teses não são válidos. Uma publicação eletrônica, após 2011, com DOI, pode ter validade, desde que cumpra certas formalidades, ou seja, (i) que a publicação seja registrada no Zoobank, responsável pelo *Official Register of Zoological Nomenclature*, antes de ser publicada na internet; (ii) que o trabalho deixe claro que este registro no Zoobank ocorreu; (iii) que o registro no Zoobank contenha o nome de um disponibilizador ("archive") eletrônico que fornecerá o arquivo e o ISSN ou ISBN do trabalho, e (iv) que o trabalho declare a data de sua publicação. Claramente, esse não é o caso do estudo de Bruno (2009) e, desse modo, o nome *Pseudopteria beurleni* não é válido (*nomen nudum*). Além disso, Bruno (2009) refere-se à ocorrência dos Bakevelliidae no nível das concreções carbonáticas (parte média da sucessão sedimentar da Formação Romualdo), contendo abundantes peixes fósseis, o que sabemos hoje não é correto (vide Fürsich et al., 2019). Em outras palavras, a despeito das relevantes informações paleontológicas contidas no estudo de Bruno (2009), três problemas cruciais não foram solucionados, isso é: (i) não existe a publicação formal dos dados, segundo o ICZN; (ii) a posição estratigráfica dos fósseis na sucessão vertical da Formação Romualdo é imprecisa; e (iii) os fósseis estão mal preservados, com as conchas recristalizadas, dificultando ou mesmo impedindo a descrição das feições anatômicas internas (impressões musculares) dos bivalves. Os problemas citados nos itens ii e iii não afetam o material de estudo, possibilitando a descrição dos Bakevelliidae da Formação Romualdo e interpretação e compreensão dos mecanismos que geraram as concentrações fossilíferas ricas em conchas deste grupo de bivalves.

Em razão das discussões acima, postula-se aqui que, no terço superior da Formação Romualdo, existiram condições deposicionais possivelmente marinhas, indicadas, dentre outras evidências, pela presença de bivalves Bakevelliidae. Conforme dados prévios (vide seções em Sales, 2005; Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019), as concentrações podem ser acompanhadas, lateralmente, por longas distâncias. Outro aspecto estratigráfico importante é que, na sucessão sedimentar de Sobradinho, o intervalo coquinóide parece indicar mudanças paleoambientais e/ou paleoclimáticas importantes, as quais possibilitaram a geração de sedimentos carbonáticos na Bacia do Araripe. Quais os processos teriam sido responsáveis por tal alteração? Teria havido aridização, a qual limitaria o aporte de sedimentos silicilásticos nas áreas proximais, possibilitando a deposição carbonática e o estabelecimento de uma fauna

distinta de moluscos bivalves, durante fase de máxima inundação marinha? Notavelmente, os Bakevelliidae estão presentes também na Bacia de Sergipe, Forma o Riachuelo (vide dados em Hessel & Filizola Jr., 1989; Hessel, 2004; Mello et al., 2007; Pereira et al., 2015), provavelmente no Membro Maruim, onde estão associados a abundantes fósseis de equinóides. Se esses dados estiverem corretos haveria mais uma evidência da presença de um *seaway* entre as bacias do Araripe e Sergipe-Alagoas, conforme postulado em Martill (1993) e Assine et al. (2016).

2. OBJETIVOS

Em razão dos comentários acima, essa disserta o tem por objetivo o estudo (i) taxonômico, (ii) estratigráfico/tafonômico, (iii) paleoecológico e de (iv) biocorrela o dos Bakevelliidae da Forma o Romualdo, com base nas ocorrências das bordas leste e oeste da Bacia do Araripe, estados do Ceará, Pernambuco e Piaul . Esses dados foram integrados aos de natureza sedimentológica já disponíveis para as se oes estudadas (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019), com a finalidade de melhor estabelecer as condi oes paleoambientais e paleogeográficas do intervalo estratigráfico de ocorrência destes fósseis.

3. REGISTROS DE BAKEVELLIIDAE NO CRETÁCEO DO BRASIL

No Cretáceo do Brasil, os bivalves Bakevelliidae estão registrados em três bacias sedimentares do Nordeste, incluindo: Araripe, Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas (Fig. 1). Na Bacia de Sergipe-Alagoas, *Gervillia dissita* foi descrita por White (1887a), nas rochas cretáceas provenientes da localidade de Porto dos Barcos, Estado de Sergipe. No mesmo ano, White (1887b) descreveu um novo g nero, *Aguileria* White (1887b) para o Cretáceo do Texas, mencionando que (i) *Gervillia renauxiana* Mathéron, 1852, do Cretáceo da França, deveria ser incluído no g nero novo, e (ii) *Gervillia dissita*, do Cretáceo do Brasil provavelmente também pertencia ao g nero texano. Posteriormente, Maury (1936) manteve a espécie *dissita*, como um táxon válido dentro do g nero *Gervilleia* Defrance, 1820 (*sensu* Maury, 1936). Na mesma contribui o, ela também descreve uma nova espécie, *Gervilleia regoi*. Meio século depois do estudo de Maury (1936), as espécies *Gervilleia dissita* e *G. regoi* foram redescritas por Hessel & Filizola Jr. (1989), referindo-os a *Aguileria* White, 1887b e tecendo considera oes relativas à morfologia geral das conchas, forma da aurícula e o número e posi o dos resil feros na área ligamentar.

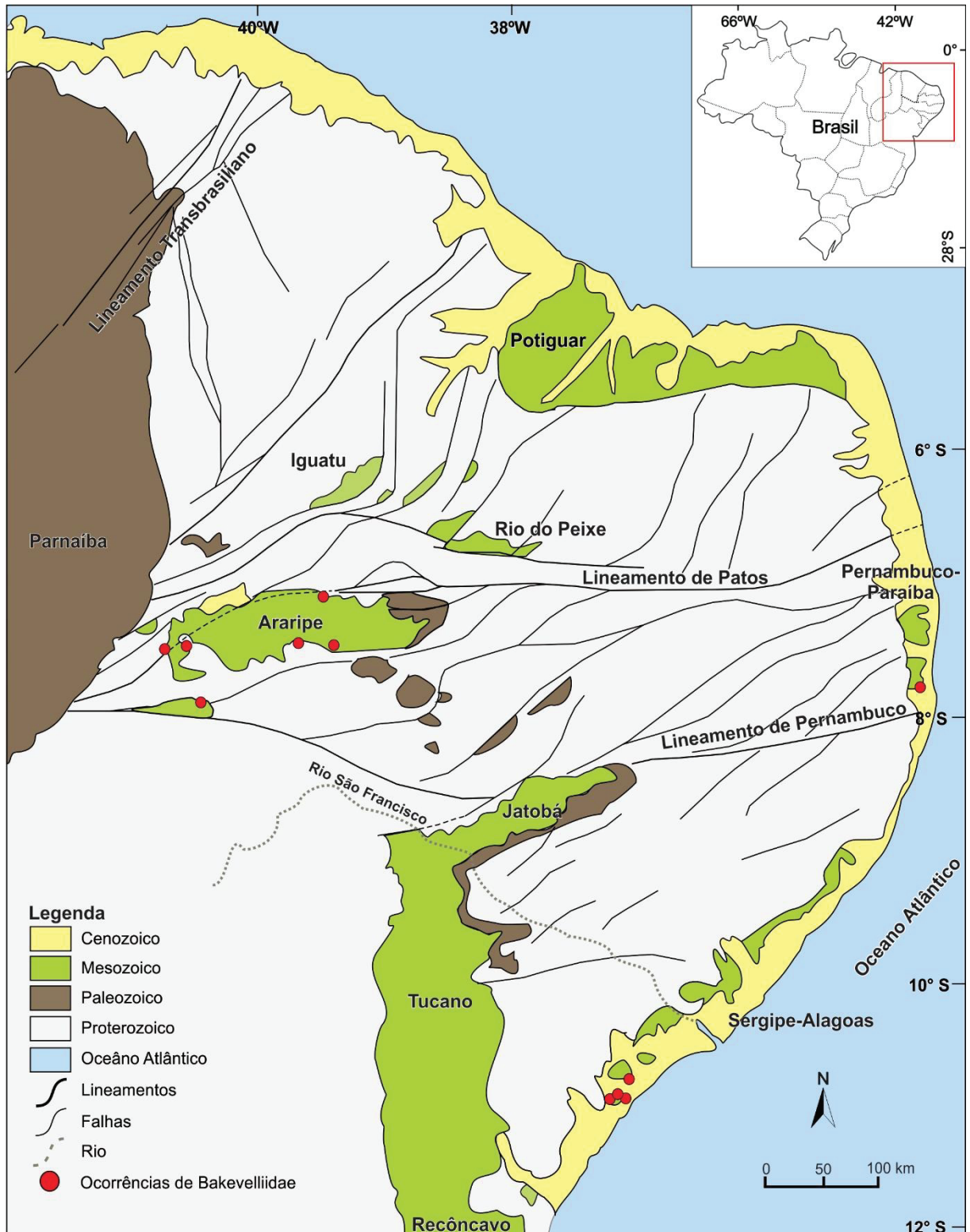


Figura 1 — Ocorrências de bivalves Bakevelliidae nas bacias sedimentares do nordeste brasileiro (base cartográfica: Assine, 1990).

Deve-se a Hessel (2004) e Mello et al. (2007) os artigos que mais exploraram as questões morfológicas e ecológicas dos bivalves Bakevelliidae na Bacia de Sergipe-Alagoas. Por exemplo, Hessel (2004) estudou 13 espécimes coletados nas localidades de Espírito Santo

11 e Mangueira 1 (Tabela 1 para coordenadas UTM), município de Riachuelo, Estado de Sergipe. Os exemplares foram coletados em rochas siliciclásticas do Membro Angico, da Formação Riachuelo, na parte sul da Bacia de Sergipe-Alagoas. Hessel (2004) concluiu que seus espécimes pertenciam a *Gervillia (Gervillia) solenoidea* DeFrance, 1820, taxón comum do Cretáceo Europeu (Abdel-Gawad, 1986; Heinberg, 1999). Ainda, de acordo com Hessel (2004), as feições morfológicas das valvas de *G. (G.) solenoidea* indicam um hábito de vida epifaunal pendente. Além disso, Hessel (2004) mencionou a ocorrência de restos de equinóides associados a *G. (G.) solenoidea* e a presença de ostreídeos e tubos calcários de vermes indicativos de águas marinhas rasas e bem oxigenadas. Por sua vez, Mello et al. (2007) apresentou a descrição de uma nova espécie, *Gervillia (Gervillia) sergipensis*, com base em coleção científica constituída de 78 espécimes preservados como moldes externos e conchas originais retiradas de blocos de calcários. Os espécimes foram coletados nas camadas basais da Formação Riachuelo, em duas localidades distintas: Coqueiro 1 e Taquari 1 (Tabela 1), município de Riachuelo, Estado de Sergipe. Estas camadas são datadas como Aptiano-Albiano baseadas em zonas de amonites (Zucon, 2005). Segundo Mello et al. (2007), o posicionamento de *G. (G.) sergipensis* como nova espécie do subgênero *G. (Gervillia)* é sustentada pelo fato dos exemplares apresentarem características diagnósticas na charneira (e.g., dentes transversais e crenulações). Esses autores enfatizaram que a identificação da espécie *G. (G.) solenoidea*, fundamentada em características morfológicas externas da concha, tais como a forma das valvas, da asa posterior, da área ligamentar e descontinuidade bissal (ver Hessel, 2004) é imprópria, pois são compartilhadas por muitas outras espécies de Bakevelliidae, não sendo diagnóstica e nem robusta para a identificação específica.

Mello et al. (2007) estudaram exemplares das mesmas localidades de Hessel (2004), comentando que os espécimes possuem asa triangular bem desenvolvida e cinco cavidades ligamentares bem marcadas. No entanto, os autores notaram que a forma da asa posterior pode ser modificada por agentes tafonômicos e que este aspecto, portanto, deve ser considerado nas comparações morfológicas. Mello et al. (2007) concluem que os espécimes identificados como *G. (G.) solenoidea* por Hessel (2004) pertencem a *G. (G.) sergipensis*. Adicionalmente, Mello et al. (2007) fazem alguns comentários sobre as interpretações paleoautoecológicas de Hessel (2004), sugerindo que o hábito de vida inferido para *G. (G.) solenoidea* pode não estar correto. Segundo Mello et al. (2007), *G. (G.) sergipensis* deve ter tido hábito de vida semi-infaunal.

Para a Bacia do Araripe, a família Bakevelliidae foi registrada, pela primeira vez, em calcários da Formação Romualdo, na localidade de Lagoa de Dentro-Rancharia, no município

de Araripina, borda leste da bacia (Beurlen, 1963). Nesta ocasião, uma espécie de Bakevelliidae foi registrada e referida a *Aguileria* sp. (Beurlen, 1963, 1971). Mais tarde, Mabesoone & Tinoco (1973) e Sales (2005) mencionaram novamente a ocorrência descrita por Beurlen (1963, 1971) sem ilustrar ou descrever novos espécimes.

Bivalves Bakevelliidae foram também mencionados por Bruno (2009), Bruno & Sial (2009) e Pereira et al. (2015), nas bordas leste e oeste da bacia. Bruno (2009) apresenta um estudo taxonômico e paleoecológico detalhado dos Bakevelliidae coletados na localidade de Sobradinho, Distrito de Jardim, Estado do Ceará (Tabela 1), provenientes de uma escavação aberta por Sales (2005). Bruno (2009) descreve 25 valvas esquerdas e sete valvas direitas oriundas de calcários coquinóides da Formação Romualdo. O estudo de Bruno (2009) revelou a presença de uma nova espécie de Bakevelliidae na bacia, atribuído a *Pseudoptera beurleni*, uma concha fina, lisa, inequivalve, do tipo mitiliforme, apresentando longa linha cardinal e umbo saliente. A presença de pequena aurícula anterior arredondada e subtriangular, aurícula posterior grande, alongada, assim como cavidades ligamentares finas e regularmente espaçadas caracteriza a espécie (Bruno, 2009). *Pseudoptera beurleni* provavelmente foi um bivalve suspensívoro de semi-infauna, que colonizou fundos em locais de águas meso-halinas calmas, vivendo ancorado sub-verticalmente e preso ao substrato por um bisso, com suas aurículas finas totalmente ou quase totalmente enterradas, conferindo maior estabilidade vertical (Bruno, 2009).

Mais recentemente, Pereira et al. (2015) descreveu *Aguileria dissita* a partir de espécimes coletados em calcarenitos da Formação Romualdo, nas localidades de Fazenda dos Izaques e Sítio Torrinha, Araripina, Estado de Pernambuco. *Aguileria dissita* possui concha biconvexa, subequivalve, espessa e deve ter sido fixada ao fundo por bisso. Portanto, estas feições morfológicas sugerem hábito de vida de semi-infauna, inclinada em substratos moles (Pereira et al., 2015). De acordo com Pereira et al. (2015), a espécie é a mesma descrita por White (1887a) e redescrita por Maury (1936). No entanto, *Aguileria dissita* difere de *G. (G) regoi* Maury, 1936 por ter concha mais ereta e sub-retangular, com a área do ligamento sub-retangular, enquanto *Aguileria renauxiana* White, 1887b tem concha mais ereta, apresentando sulco anterior bem marcado e área ligamentar sub-retangular (Pereira et al., 2015).

Fürsich et al. (2019) mencionam a ocorrência de *Bakevellia* King, 1848 nas coquinas da porção superior da Formação Romualdo, na localidade de Sobradinho, Estado do Ceará. Os autores consideraram *Bakevellia* sp. um bivalve epibissado, de hábito alimentar suspensívoro, destacando que a espécie poderia corresponder a *Aguileria dissita* White, 1887a. No entanto,

parece que os espécimes referidos a *Bakevelliia* sp. por Fürsich et al. (2019) na verdade, pertence a um dos táxons descritos nesta dissertação.

Na Bacia de Pernambuco-Paraíba são raros os estudos que citam a ocorrência de Bakevelliidae. Os artigos de Kegel (1957) e Guimarães (1964) reportam a ocorrência de *Gervillia* sp. em arenitos cinzentos do Membro Beberibe, da Formação Itamaracá, Vale do Rio Beberibe, a oeste de Recife, Estado do Pernambuco.

Tabela 1 — Registro histórico das espécies de Bakevelliidae encontradas nas bacias sedimentares interiores do nordeste brasileiro. A nomenclatura estratigráfica segue a dos autores originais.

Bacia	Unidade Geológica	Localidade/ Coordenadas (UTM)	Autores	Espécies
		Lagoa de Dentro-Rancharia, Araripina (PE)	Beurlen (1963); Beurlen (1971), citação	<i>Aguileria</i> sp.
		—	Mabesoone & Tinoco (1973), citação	<i>Aguileria</i> sp.
		Lagoa de Dentro, Araripina (PE)	Sales (2005), citação	<i>Aguileria</i> sp.
Araripe	Fm. Romualdo	Sobradinho, Distrito de Bom Jardim (CE) - 24M UTM 9163112N/481859E	Bruno & Sial (2009), citação; Bruno (2009) descrição formal (não publicado)	<i>Pseudoptera beurleni</i>
		Fazenda dos Izaques e Sítio Torrinha, Araripina (PE)	Pereira et al., (2015), descrição formal	<i>Aguileria dissita</i>
		Ladeira do Belenga, (Simões, PI); Canastra, Torre Grande, Torrinha e Lagoa de Dentro (Araripina, PE);	Pereira et al., (2017), citação	<i>Aguileira dissita</i>

		Santo Antônio e Cedro (Exu, PE)		
		Sobradinho: 24M UTM 9163112N/481911 E) ~20km de Jardim (CE)	Fürsich et al., (2019), citação	<i>Bakevella</i> sp.
Pernambuco- Paraíba	Mb. Beberibe, Fm. Itamaracá	Vale do Rio Beberibe, oeste de Recife (PE)	Kegel (1957); Guimarães (1964), citações	<i>Gervillia</i> sp.
		Porto dos Barcos, Trapiche das Pedras Velho e Coqueiro, Província de Sergipe	White (1887a), descrição formal	<i>Gervillia dissita</i>
		Pasto da Carregoza, entre Riachuelo e Tanque (SE)	Maury (1936), descrição formal	<i>Gervilleia dissita</i> ; <i>Gervilleia regoi</i>
Sergipe- Alagoas	Fm. Riachuelo	Coqueiro 1: 24L UTM 8815129N/698953E e Taquari 1: 24L UTM 8823752N/716027E	Mello et al. (2007), descrição formal	<i>Gervillia sergipensis</i>
		—	Hessel & Filizola Jr. (1989), descrição formal (não publicado)	<i>Aguileria dissita</i> ; <i>Aguileria regoi</i>
	Mb. Angico, Fm. Riachuelo	—	Hessel (2004), descrição formal	<i>Gervillia (Gervillia) solenoidea</i>

4. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

A Bacia do Araripe apresenta forma alongada, na direção E-W (Assine, 2007), sendo uma das maiores do interior do nordeste brasileiro, abrangendo as regiões sul do Estado do Ceará, oeste de Pernambuco e leste do Piauí (Fig. 2). Das bacias interiores do nordeste brasileiro, essa é a que apresenta a história geológica mais complexa e de maior completude estratigráfica (Assine, 2007), estando implantada em terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema, a sul do Lineamento de Patos e a norte do Lineamento de Pernambuco (Brito-Neves et al., 2000).

A bacia se destaca, geomorfologicamente, pela elevação conhecida como Chapada do Araripe, limitada por escarpas erosivas e íngremes, de topo plano com mergulho suave para oeste (Morales & Assine, 2015). A topografia atual da bacia, cujas maiores altitudes estão na borda leste, deve-se a recentes movimentos ao longo de falhas reversas de direção NW-SE com mergulho para NE, associados a uma fase de inversão causada por esforços compressivos oriundos dos movimentos da placa de Nazca e da cordilheira meso-oceânica (Marques & Moulin, 2011).

O registro geológico do mesozoico na Bacia do Araripe é caracterizado por três sequências estratigráficas (Fig. 2): (i) rifte (Andares Dom João e Rio da Serra); (ii) pós-rifte I (Andar Alagoas = Aptiano); (iii) pós-rifte II (Albiano/Cenomaniano) (Assine, 2007). A sucessão pós-rifte I da Bacia do Araripe é composta, da base para o topo, pelas formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo, que compõem o Grupo Santana (Assine et al., 2014).

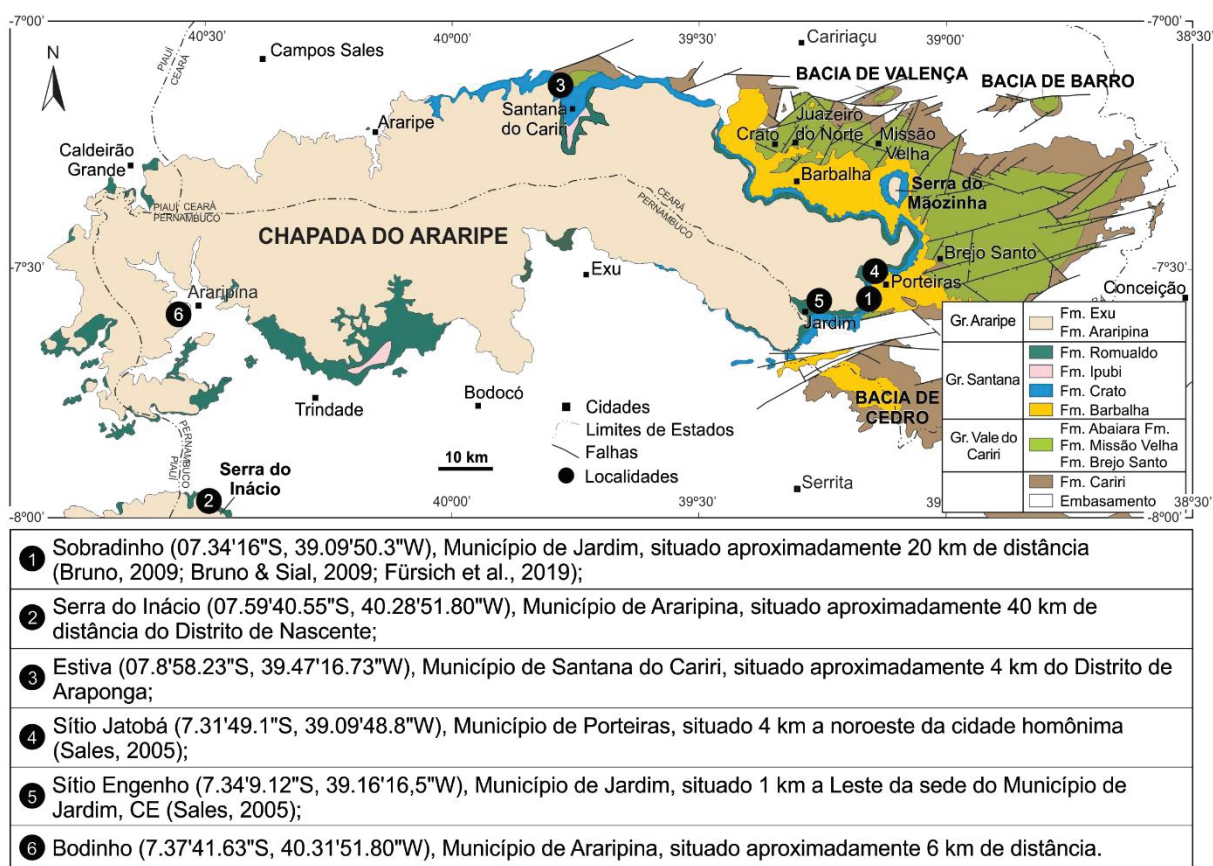


Figura 2 — Mapa geológico da Bacia do Araripe com as localidades onde os fósseis estudados foram encontrados (modificado de Assine et al., 2014).

A Formação Romualdo é uma unidade predominantemente siliciclástica que pode atingir até 100 m de espessura na borda leste da Bacia do Araripe, diminuindo de espessura em direção a borda oeste (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). Em geral, a unidade é

composta da base para o topo, por: (i) arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada e folhelhos, depositados em planície aluvial costeira; (ii) arenitos finos a médios, micáceos, com estratificação cruzada sigmoide, laminação cruzada, fácies heterolíticas e folhelhos depositados em áreas costeiras dominadas por maré; (iii) folhelhos e arenitos com estratificação cruzada *hummocky* formados em plataformas marinhas rasas; (iv) folhelhos com abundantes concentrações de concreções carbonáticas fossilíferas, sugestivas de deposição em plataforma marinha profunda (i.e., abaixo do nível de base de ondas de tempestade) e cujo topo constitui superfície de máxima inundação; (v) folhelhos e calcários fossilíferos (gastrópodes, bivalves e camarões fósseis) característicos de plataforma marinha rasa; (vi) coquinas originadas por fluxos ou ondas de tempestade; e (vii) arenitos com estratificação cruzada sigmoide, laminação cruzada, fácies heterolíticas e folhelhos formados em áreas costeiras dominadas por maré (Custódio et al., 2017; Fig. 3):

A Formação Romualdo é uma unidade influenciada por deposição marinha correspondendo a uma sequência deposicional contendo dois ciclos transgressivo-regressivos (TR; Fürsich et al., 2019). O primeiro ciclo TR inclui folhelhos negros portadores de concreções ricas em fósseis com preservação excepcional de tecidos moles (Santana *Konzervat-Lagerstätten*; Maisey, 1991; Fara et al., 2005; Martill et al., 2007). A fauna existente do primeiro ciclo TR, que inclui inúmeros vertebrados e principalmente peixes, difere drasticamente daquela preservada no segundo ciclo TR. Neste, diversas concentrações conchíferas ocorrem em sucessões mistas carbonáticas-siliciclástica de até 5 m de espessura depositadas em condições de alta energia (Fürsich et al. 2019). Parte desses carbonatos correspondem a uma das mais importantes fases marinhas na Bacia do Araripe, em um período de condições de salinidade marinha quase normal onde equinóides e bivalves *Bakevelliidae* prosperaram (veja também Beurlen, 1966; Martill, 2007, p. 912).

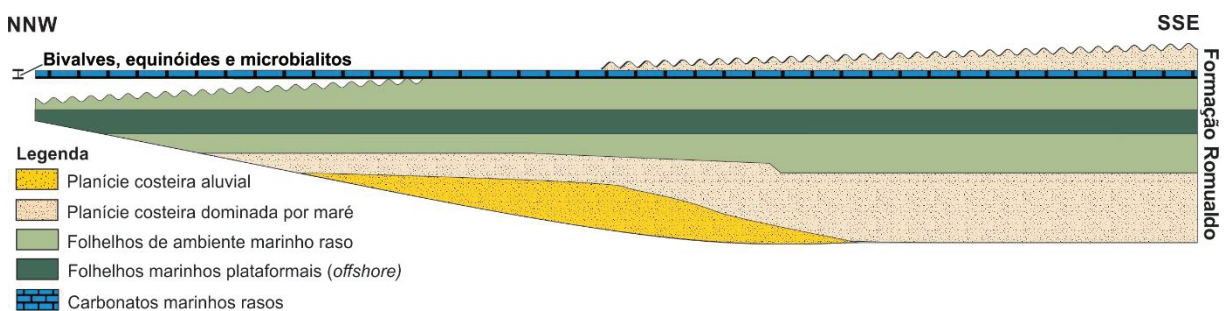


Figura 3 — Diagrama idealizado mostrando a sequência deposicional da Formação Romualdo, na Bacia do Araripe (modificado de Custódio et al., 2017; Varejão et al., 2019).

A Formação Romualdo, de idade aptiana é conhecida internacionalmente por seu rico conteúdo fóssilífero (vide Maisey, 1991 e Martill et al., 2007; vide também Tabela 2), particularmente os ictiofósseis encontrados em concreções carbonáticas, na metade inferior da unidade (Kellner, 2002; Valença et al., 2003; Fara et al., 2005). Fora esses, a unidade apresenta ainda abundantes macrofósseis de tetrápodes, como crocodilos, tartarugas, pterossauros e dinossauros (veja Beurlen, 1971; Broin, 1994; Hirayama, 1998; Kellner & Campos, 2000; Martill, 2007, dentre outros autores). Muitos invertebrados, microfósseis (Lima, 1978; Coimbra et al., 2002), plantas fósseis (gimnospermas e algumas angiospermas) são também registradas na unidade (Carvalho & Santos, 2005), bem como ocorrências de preservação de âmbar (Valença et al., 2003).

Na década de 1960, o número de estudos de cunho geológico na Formação Romualdo aumentou, porém ainda há grande divergência quanto à interpretação do paleoambiente deposicional (Custódio, 2017). Estudos de macrofósseis sugerem condições marinhas rasas (Santos, 1982) e a análise de palinórfos indica ambientes costeiros mixohalinos, possivelmente lagunas (Arai & Coimbra, 1990). Esses dados também são confirmados por estudos fundamentados na análise do conteúdo de carbono orgânico dos folhelhos (Viana & Agostinho, 1995). Corroborando com os autores supracitados, Sales (2005) interpreta o ambiente como transicional (lagunar), associado a incursões marinhas albianas. Na metade superior da unidade, o autor descreve a presença de moluscos, dinoflagelados, foraminíferos e equinóides, acumulados em concentrações fóssilíferas, interpretados como *lags* residuais, relacionadas à superfície de ravinamento por onda, correspondendo à superfície de inundação máxima marinha na sequência (Assine, 2007). No entanto a interpretação de que a Formação Romualdo seja lacustre ainda é persistente na literatura (Moura, 2007).

Tabela 2 — Relação dos vários grupos de fósseis de importância cronoestratigráfica da Formação Romualdo (Custódio, 2017).

Idades	Autores	Argumentos
Albiano	Beurlen (1964)	Gastrópodes (Cassiopinae), nova subfamília dos Turriteliidae
	Lima (1978)	Palinórfos - Zona <i>Complicatisaccus cearensis</i> (espécies <i>Stellatopollis</i> ; <i>Dicotetradites</i> sp.; <i>Gnetaceaepollenites ornatos</i> ; <i>G. perforatus</i>)
	Coimbra et al. (2002)	Conchostráceos, moluscos, dinoflagelados e microforaminíferos

Aptiano/ Albiano	Valença et al. (2003)	Biozona <i>Elasterosporites protensus</i>
	Heimhofer & Hochuli (2010)	Pólen e esporos - <i>Stellatopollis barghoornii</i> , <i>Dichastopollenites</i> cf. sp. e <i>Retimonocolpites</i> aff. sp.
	Braun (1966)	Paleozona Z-7 - Dentes e fragmentos de ossos de peixes; crustáceos <i>Candonopsis</i> sp.
	Santos (1982)	Concreções com peixes - Biozona <i>Vinctifer</i> (<i>Aspidorhynchus</i>)
	Brito (1984)	Biozona <i>Vinctifer</i> (<i>Aspidorhynchus</i>); Ostracode <i>Cytheridae</i> ?
	Arai et al. (2000)	Dinoflagelados - Ecozona <i>Subtilisphaera</i>
	Tomé et al. (2014)	Ostracodes - <i>Pattersonocypris angulata</i> ; <i>P. micropapillosa</i> e <i>P. salitrensis</i>
	Silva-Santos & Valença (1968)	Inclusão de peixes fósseis pertencentes aos gêneros <i>Rhacolepis</i> , <i>Ophiopsis</i> , <i>Aspidorhynchus</i> e <i>Microdon</i> .
Aptiano	Mabesoone & Tinoco (1973)	Fauna pertencente ao gênero <i>Rhacolepis</i>
	Arai & Coimbra (1990)	Dinoflagelados - Ecozona <i>Subtilisphaera</i>
	Regali (2001)	Palinozona <i>Complicatisaccus cearensis</i> (<i>S. variverrucata</i>)
	Rios-Netto & Regali (2007)	Palinozona <i>Complicatisaccus cearensis</i> (<i>S. variverrucata</i>)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Diversas atividades de campo e laboratório, dentre outras, foram desenvolvidas. Essas atividades, foram realizadas no Departamento de Geologia Aplicada, IGCE/Unesp, *campus* Rio Claro e no Laboratório de Paleozoologia Evolutiva, do Instituto de Biociências/Unesp, *campus* Botucatu. As atividades realizadas são descritas a seguir.

5.1 Levantamento de dados de campo

Foram realizadas três campanhas de campo em afloramentos das unidades fossilíferas da Bacia do Araripe nos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Análises detalhadas foram realizadas para duas seções estratigráficas onde afloram os sedimentos da Formação Romualdo,

são elas: Seção de Sobradinho (Sales, 2005; Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019), localizada aproximadamente 20km de distância do município de Jardim, estado do Ceará, borda leste da bacia e Seção da Serra do Inácio (Custódio, 2017), localizada aproximadamente 40km de distância do distrito de Nascente, município de Araripina, estado de Pernambuco, sudoeste da bacia. Além disso, amostras previamente coletadas por Sales (2005) em afloramentos distribuídos ao longo da bacia, também foram objeto de estudo (ver Fig. 2).

Além da coleta de fósseis para descrições taxonômicas, realizou-se também em campo, descrições e coletas para os estudos tafonômicos, que seguiram as recomendações sugeridas por Brett & Baird (1986), Kidwell (1991), Kidwell & Holand (1991) e Simões & Ghilardi (2000). Sendo assim, as amostras coletadas consistem em blocos centimétricos, dada a impossibilidade de coleta e transporte de blocos métricos. As observações foram realizadas com especial atenção à espessura, continuidade lateral (quantitativa), geometria, contatos, grau de empacotamento e assinaturas tafonômicas dos bioclastos (qualitativa). Procurou-se amostrar as camadas de interesse de modo detalhado, desde a base até o topo, sempre considerando as variações laterais. Além disso, as camadas que não puderam ser coletadas inteiras, pois eram muito espessas ou frágeis, foram coletadas em blocos menores, que em conjunto, representam todo o intervalo. Tais blocos foram numerados e reconstituídos no laboratório considerando a orientação original.

Espécimes coletados em campo, assim como os espécimes da coleção preexistente do Laboratório de Paleozoologia Evolutiva (IBB/Unesp), somam mais de 440 espécimes de moluscos fósseis disponíveis para estudo, os quais se encontram armazenados no Instituto de Biociências da UNESP/Botucatu.

5.2 Atividades de laboratório

5.2.1 Seções polidas (Slab)

As amostras coletadas em campo para finalidades tafonômicas, foram seccionadas em laboratório de preparação de amostras, através de serras diamantadas, obtendo assim, amostras com superfícies planas. Após a secção, as amostras foram polidas através de uma politriz elétrica. Em seguida, as amostras foram escaneadas em um scanner Epson Perfection V700 Photo obtendo-se assim várias imagens em alta-resolução das seções polidas (2200dpi), permitindo então, a observação detalhada da biofábrica das rochas e a seleção das regiões de interesse para a confecção das lâminas delgadas.

5.2.2 Análise petrográfica

A análise petrográfica contribuiu para a caracterização dos tipos de rochas carbonáticas e seus processos formadores. Assim sendo, as amostras coletadas em campo para análise tafonômica, também foram utilizadas para confecção de lâminas petrográficas (n = 9). As lâminas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação da Unesp/Rio Claro.

Definido originalmente por Brown (1943), o termo microfácies refere-se a critérios petrográficos e paleontológicos estudados em lâminas delgadas, seções polidas ou amostras de rocha (Flügel, 2010). Para a caracterização petrográfica das microfácies, foi utilizada a classificação microscópicas de acordo com Dunham (1962), Embry & Klovan (1971) e Tucker & Dias-Brito (2017). As microfácies foram descritas com uso de microscopia óptica de luz transmitida através de um microscópio Zeiss Axio Imager A.2, do Laboratório de Petrografia Sedimentar (LPS) no Centro de Pesquisas Aplicadas ao Petróleo (Unespetro). As fotomicrografias foram obtidas pelo mesmo microscópio.

5.2.3 Preparação e moldagem dos espécimes

Em estudos sistemáticos de bivalves fósseis, a precisa interpretação e descrição de feições morfológicas, tais como impressões musculares, estruturas da charneira e ornamentação são de extrema importância para a correta classificação dos mesmos. Os fósseis estudados foram limpos à seco com pincel, e quando necessário, preparados com ferramentas de precisão, a fim de expô-los, quando recobertos por matriz, possibilitando a análise das feições morfológicas internas e externas das conchas.

O processo de moldagem em látex, têm como objetivo ressaltar feições morfológicas, assim como produzir imagens de estruturas negativas, permitindo, portanto, observações detalhadas de estruturas morfológicas. De forma resumida, a moldagem seguiu tais fases: (i) foram aplicadas camadas de látex diluído em água e pigmentado com nanquim preto; (ii) o processo anterior repetiu-se várias vezes, aumentando a concentração de látex a cada nova aplicação até que o espécime ou estrutura estivesse completamente recoberto; (iii) tiras de gaze foram então intercaladas com as camadas grossas de látex, para que o molde se tornasse estável quando manipulado; (iv) após a secagem completa, que levou aproximadamente 24h, o molde foi retirado do fóssil e suas bordas aparadas com tesoura.

Alternativamente, foi utilizado para a moldagem de alguns espécimes, a massa de cerâmica plástica da marca FIMO na cor preta. Nesse caso, a massa é impressa contra o fóssil, obtendo-se um contra-molde do mesmo. Em seguida, a massa deve ser levada ao forno a

110°C/130°C durante 30 minutos, para endurecer e adquirir uma consistência rígida. A vantagem desse processo reside no fato dele ser mais rápido do que o tempo dispensado para obtenção do molde de látex.

5.2.4 Fotodocumentação

Os espécimes foram recobertos com tinta nanquim preta e, após a secagem da mesma, recobertos por uma fina camada de fuligem de magnésio metálico, de modo a evidenciar o relevo das estruturas da concha. Os moldes produzidos em látex e em cerâmica plástica também passaram por este processo. Após esse procedimento os espécimes foram fotografados individualmente, com uma câmera DSLR Nikon, modelo D3200, equipada com uma lente AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED. A fim de gerar uma imagem com ampla profundidade de foco, o uso desta lente exigiu várias fotografias, com planos de foco distintos que, por sua vez, foram posteriormente mescladas utilizando uma técnica chamada *Focus Stacking* ou *Image Stacking* (i.e., empilhamento de imagens), realizada através do software Adobe Photoshop CC v. 20.0.1. Visto que cada exemplar fóssil pode exigir a produção de, em média, cerca de 20 a 25 imagens, e que o processo de mesclagem leva aproximadamente 15 minutos por amostra (a depender do processador do computador utilizado), portanto, a digitalização de centenas de amostras exigiu meses de dedicação. Posteriormente, as fotografias foram tratadas através do software de edição Corel PHOTO-PAINT X8 (64-bit), com a finalidade de melhorar parâmetros como saturação e contraste.

5.2.5 Elaboração de banco de dados

Banco de dados contendo informações referentes às dimensões (altura, largura, comprimento, etc) e à tafonomia (tipo de valva, modo de preservação, articulação) dos bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo foi produzido no software Microsoft - Excel 2016. Ao todo foram registrados 440 espécimes. Esses dados foram utilizados para análises paleoecológicas e tafonômicas. Para detalhes de terminologia e características medidas seguiu-se Muster (1995) e Lazo (2003).

5.2.6 Ilustração

Depois de analisados, os espécimes foram selecionados para serem esboçados, àqueles que estavam mais bem preservados e que continham caracteres diagnósticos. Os esboços foram

gerados por meio de software de edição vetorial gráfica CorelDRAW X8 (64-bits). Em seguida, foram montadas pranchas para serem utilizadas nos artigos científicos.

5.2.7 Análise taxonômica e paleoecológica

O estudo taxonômico dos Bakevelliidae seguiu os artigos de Cox (1969), Muster (1995), Lazo (2003), Tëmkin (2006) especialmente para a descrição das feições morfológicas diagnósticas, tais como: ligamento, distribuição dos músculos. A classificação taxonômica supragenérica seguiu Bieler et al. (2010) e as interpretações paleoecológicas foram fundamentadas em Stanley (1970, 1972), Seilacher (1984), Aberhan (1994), Muster (1995), Aberhan & Muster (1997).

5.2.8 Análise tafonômica

Para essa análise, a metodologia e terminologia empregadas seguiram Kidwell & Holland (1991), Kidwell et al. (1986), Brett & Baird (1986) e Fürsich & Oschmann (1993). Foram examinadas feições padrão, incluindo: (i) biotrama (=biofábrica), referente ao arranjo tridimensional dos fósseis na matriz, podendo ocorrer, em seção, de forma concordante, oblíqua, perpendicular, imbricada, empilhada ou aninhada (Kidwell & Bosence, 1991), e (ii) as assinaturas tafonômicas, tais como desarticulação, fragmentação, bioerosão. Esses dados associados aos de natureza sedimentológica, tais como granulação, grau de seleção, estruturas sedimentares, o grau de empacotamento e geometria das camadas, possibilitaram a determinação de fatores abióticos e bióticos (Fürsich & Oschmann, 1993), responsáveis pela gênese das concentrações fossilíferas estudadas.

5.2.9 Pesquisa bibliográfica

Tendo em vista o pobre conhecimento taxonômico dos bivalves Bakevelliidae da Bacia do Araripe, fez-se necessário um extenso levantamento bibliográfico, envolvendo artigos científicos sobre sistemática e paleoecologia de bivalves da família Bakevelliidae; geologia e paleogeografia das bacias interiores do Nordeste.

6. RESULTADOS

Em decorrência das atividades desenvolvidas, foram obtidos resultados relevantes no que se refere à estratigrafia da unidade em estudo, à identificação e à descrição dos bivalves e

à interpretação da gênese das concentrações fossilíferas estudadas. Estes resultados são apresentados a seguir.

6.1 Descrição das Seções Sobradinho e Serra do Inácio

Conforme mencionado anteriormente no capítulo de Materiais e Métodos, duas seções colunares da Formação Romualdo foram estudadas (Fig. 4), as quais são descritas abaixo.

6.1.1 Seção de Sobradinho

A seção colunar de Sobradinho apresenta 100 m de espessura e representa o registro mais completo já descrito para a Formação Romualdo, tratando-se de sua seção-tipo (Custódio et al., 2017; Fig. 4). Na base da seção, em contato com a Formação Crato, ocorrem *sets* decimétricos de arenitos com estratificação cruzada sigmoide. Os estratos arenosos se adelgaçam lateralmente, apresentando base e topo planos e tangenciais às superfícies limitantes, estando separados por níveis delgados (2 a 5 cm) de folhelho preto. Também ocorrem camadas tabulares de arenitos finos a médios com estratificação cruzada acanalada de porte decimétrico intercalados com folhelhos cinza escuros, arenitos com acamamento heterolítico (*flaser*, *wavy* e *linsen*), e arenitos finos, micáceos, com laminação cruzada produzida por onda e corrente. Barras arenosas sigmoides com *drapes* de argila, acamamento heterolítico e paleocorrentes bimodais constituem feição característica dessa porção (Fig. 5A).

Sobrepostos ocorrem folhelhos e siltitos de coloração cinza, verde e preta, podendo conter altas concentrações de matéria orgânica e foraminíferos, intercalados a arenitos finos com laminação cruzada por onda e laminitos. Esses apresentam menos de 10% de bioclastos (ostracodes) e caracterizam-se por lâminas alternadas de micrita e esparita submilimétricas.

Intervalo de aproximadamente 6 m de espessura contendo folhelhos escuros ricos em concreções carbonáticas fossilíferas, ocorrem acima dos depósitos marinhos rasos. Este intervalo representa o principal jazigo fossilífero da Formação Romualdo e, em função da excelente preservação dos fósseis, é considerado um depósito do tipo *Konzervat-Lagerstätten* (Fig. 5C). As ricas concreções fossilíferas podem chegar a 80 cm de diâmetro, e contêm crustáceos, peixes, pterossauros, tartarugas, madeiras, restos vegetais e outros. Além destes fósseis, ocorrem também macro e microinvertebrados dispersos nos folhelhos. Dentre os invertebrados, são descritos bivalves, gastrópodes, camarões, também são encontrados palinomorfos e microfósseis calcários, como ostracodes. Folhelhos escuros intercalados a laminitos sucedem a camada rica em concreções. A sucessão apresenta aproximadamente 25 m de espessura e contém níveis ricos em ostracodes, bivalves, gastrópodes e camarões.

Camadas aproximadamente tabulares contendo moluscos (gastrópodes e bivalves, incluindo principalmente os Bakevelliidae), denominados de coquinas ou calcários bioclásticos ocorrem intercalados a folhelhos siltosos na sucessão (Fig. 5D). De acordo com Sales (2005), a ocorrência dessa concentração é descontínua. As camadas de coquinas exibem contatos ondulados e gradação descontínua interna, com trama bioclastos ora matriz sustentados, ora bioclasto sustentados (Sales, 2005). Os bioclastos podem ocorrer, em parte, recristalizados e os bivalves são encontrados com as valvas desarticuladas, orientados com concavidade para cima, sendo também observados exemplares com valvas articuladas e fechadas, possuindo tamanhos milimétricos a centimétricos (Sales, 2005). Tais características permitem interpretar as coquinas como depósitos formados por processos derivados de ondas de tempestade (Sales, 2005). Observações recentes de campo sugerem, porém, que é possível que alguns intervalos dessas coquinas representem superfícies de colonização dos Bakevelliidae, cujas conchas, por vezes, ocorrem inclusive preservadas *in situ*, sugerindo natureza altamente complexa para a origem desses depósitos bioclásticos, os quais corresponderiam a concentrações amalgamadas.

Finalmente, o topo da seção é caracterizado por sucessão de aproximadamente 25 m de espessura contendo camadas de arenitos com estratificação cruzada sigmoide e acanalada, intercalados com folhelhos e fácies heterolíticas.

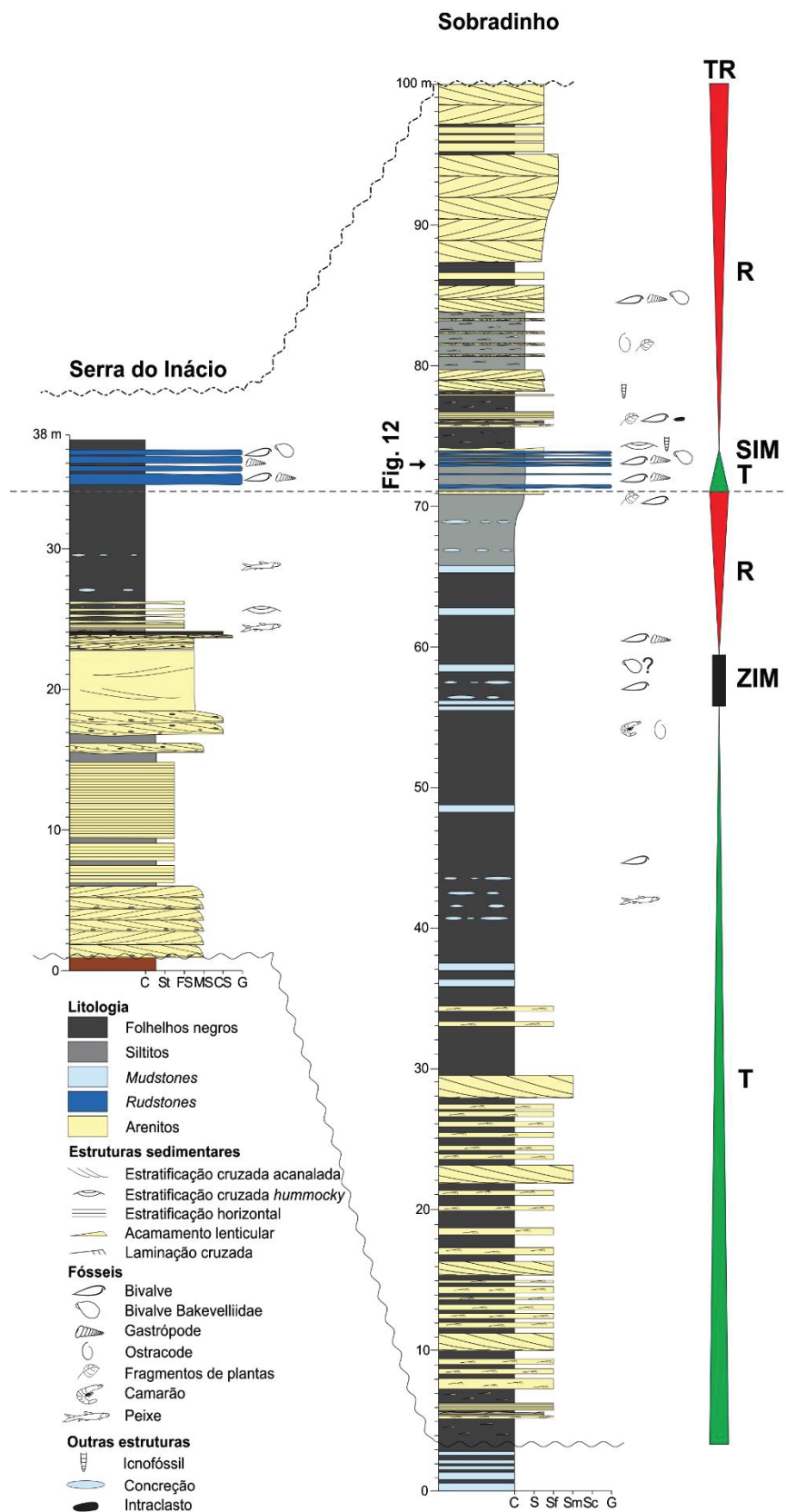


Figura 4 — Seções colunares da Formação Romualdo nas localidades de Serra do Inácio e Sobradinho, estados de Pernambuco e Ceará, respectivamente. TR – Ciclo Transgressivo-Regressivo; T – Transgressivo; R – Regressivo; ZIM – Zona de Inundação Máxima; SIM – Superfície de Inundação Máxima. Baseado em Fürsich et al. (2019).

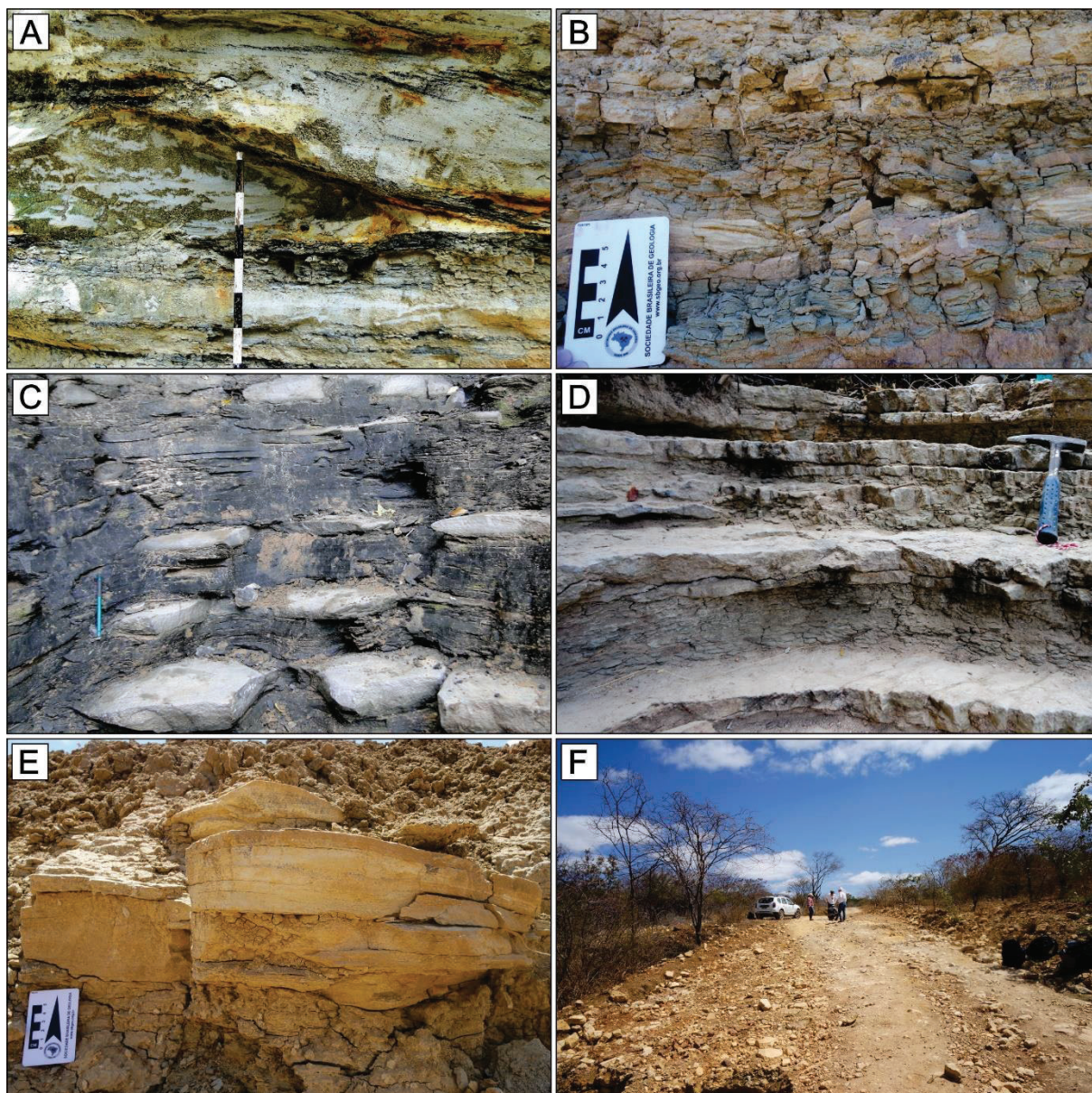


Figura 5 — Fácies sedimentares das seções colunares de Sobradinho (A, C-D) e Serra do Inácio (B, E-F). A) Barras arenosas com geometria sigmoide limitados por lâminas delgadas de argila; B) Fácies heterolítica associada a arenito com laminação cruzada cavalgante; C) Folhelho preto, rico em matéria orgânica e concreções fossilíferas; D) Camadas tabulares de coquinas e calcários bioclásticos, com espessura cm-dm intercaladas com folhelhos siltosos; E) *Packstone* peloidal com estratificação cruzada *hummocky*; F) Exposição em corte de estrada dos calcários fossilíferos na seção colunar da Serra do Inácio.

6.1.2 Seção da Serra do Inácio

A seção colunar da Serra do Inácio possui 38 m de espessura e representa o registro conhecido mais espesso da Formação Romualdo na borda sudoeste da Bacia do Araripe. A base da seção é composta por sucessão de arenito médio, mal selecionado, com grânulos dispersos e estratificação cruzada acanalada organizados em *sets* cuneiformes de porte decimétrico. Acima, arenitos finos a muito finos, micáceos, organizados em *sets* tabulares com laminação

horizontal ocorrem intercalados a siltitos verdes que tendem a diminuir de espessura em direção ao topo.

Na sucessão, arenitos grossos gradando a médios no topo, com estratificação cruzada acanalada, apresentam base erosiva, argila entre os *sets* (decimétricos) e intraclastos de argila nos *forsets*, transicionando no topo para arenitos finos a médios, mal selecionados, com estratificação incipiente. Novo ciclo de granodecrescência ascendente é marcado pela ocorrência de camadas de até 1 m de arenito grosso a muito grosso, mal selecionado, com estratificação cruzada acanalada, intercalado a siltitos verdes. Acima, estão preservados arenitos médios a finos com laminação cruzada, siltito arenoso, e arenito com acamamento heterolítico (*wavy/linsen*) com fragmentos de peixes (Fig. 5B).

Folhelhos cinza escuros intercalam-se a níveis descontínuos de arenito fino com estratificação cruzada *hummocky* (Fig. 5E) e a pequenas concreções (centimétricas) dispersas. Sobreposto, ocorre sucessão com 8 metros de espessura de folhelhos escuros portadores de ostracodes, com poucas concreções carbonáticas fossilíferas.

Finalmente, o topo da seção é caracterizado por aproximadamente 3 metros de calcários fossilíferos intercalados com folhelhos negros (Fig. 5F). Nesses calcários foram observados fósseis de bivalves e gastrópodes. Em algumas dessas camadas, são preservados pavimentos compostos por bivalves *Bakevelliidae*.

6.2 Caracterização das concentrações de Sobradinho

6.2.1 Microfácies carbonáticas

A partir da descrição microscópica das lâminas petrográficas, foram reconhecidas oito microfácies carbonáticas, brevemente descritas a seguir.

6.2.1.1 *Mudstone* com ostracodes (*Mo*)

Fácies composta predominantemente por micrita com porções localizadas apresentando recristalização (micro-esparita). Grãos angulosos de quartzo tamanho silte/areia muito fina ocorrem dispersos na matriz (Fig. 6A), assim como ostracodes com valvas articuladas fechadas e desarticuladas (de tamanho até 0,7 mm). Valvas de ostracodes ocorrem cimentadas externamente por franja acicular e internamente estão preenchidas por calcita drusiforme em mosaico (Fig. 6B).

6.2.1.2 *Wackestone* a bivalve e gastrópode (*Wbg*)

Microfácies composta por bivalves e gastrópodes (dominadamente bivalves) imersos em matriz micrítica e grãos angulosos de quartzo no tamanho silte/areia muito fina (Fig. 6C-D). Bivalves ocorrem com valvas desarticuladas e fragmentadas com arestas angulosas enquanto gastrópodes ocorrem menos fragmentados, com mesmo preenchimento que a matriz (Fig. 6D-E). Conchas de bivalves e gastrópodes ocorrem predominantemente recristalizadas por calcita espática. Em porções com maior concentração de bioclastos, a matriz ocorre recristalizada por micro-esparita (Fig. 6E-F). Fragmentos fosfáticos (vértebras de peixe) ocorrem dispersos na matriz (Fig. 6F).

6.2.1.3 *Packstone* a gastrópodes e bivalves (*Pgb*)

Esta microfácies, corresponde a uma rocha sustentada por gastrópodes e bivalves subordinadamente. Seu arcabouço, é formado por fragmentos bioclásticos menores que 2 mm (bivalves) organizados caoticamente em matriz micrítica (Fig. 7). Grãos angulosos de quartzo, tamanho silte/areia muito fina, ocorrem em grande proporção na matriz. Gastrópodes e bivalves maiores que 2 mm também estão presentes (< 10 % do arcabouço). Bivalves ocorrem predominantemente desarticulados e fragmentados (levemente angulosos a subarredondados), porém ocasionalmente são observadas valvas articuladas abertas. Conchas de bivalves e gastrópodes ocorrem predominantemente recristalizadas por calcita espática. As câmaras internas dos gastrópodes estão preenchidas por: (i) calcita mosaico (Fig. 7A); (ii) calcita com preenchimento geopetal (Fig. 7B); (iii) micrita (Fig. 7C-D); e (iv) calcita micro-cristalina e valvas desarticuladas de ostracodes (Fig. 7D-E).

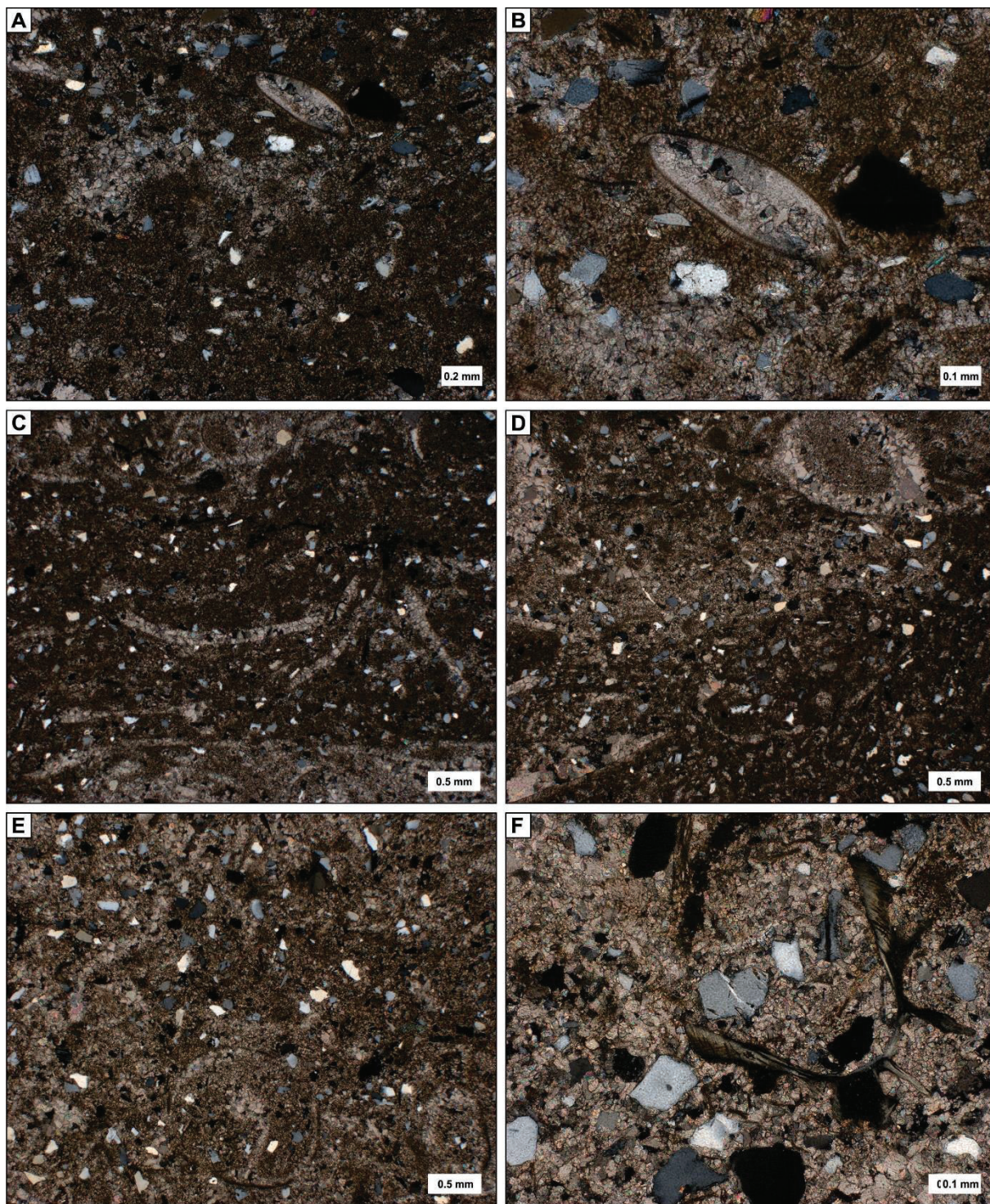


Figura 6 — *Mudstone* com ostracodes (A-B) e *wackestone* a bivalves e gastrópodes (C-F) (nicóis cruzados). A) Grãos angulosos de quartzo tamanho silte/areia muito fina dispersos pela matriz em *Mo*; B) *Mo* representado por valvas de ostracodes cimentadas por franja acicular e internamente preenchidas por calcita drusiforme em mosaico; C) *Wbg* composto por bivalves e gastrópodes imersos em matriz micrítica e grãos angulosos de quartzo no tamanho silte/areia muito fina; D) Valvas desarticuladas de bivalves com extremidades angulosas; E) Câmara de gastrópode em *Wbg* com diversos fragmentos de bivalves; F) Fragmento fosfático (vértebras de peixe).

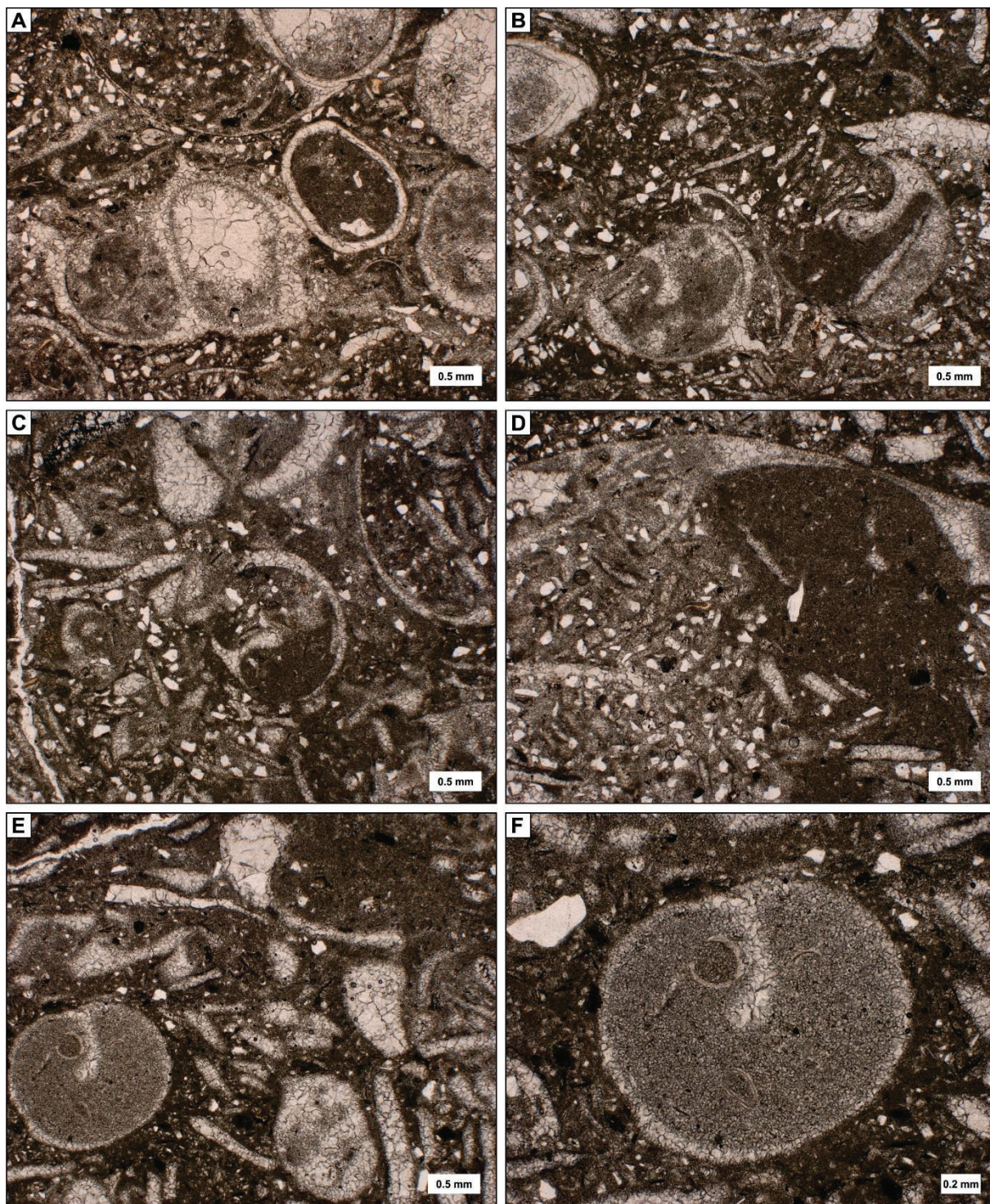


Figura 7 — *Packstone* a gastrópodes e bivalves (nicóis cruzados). A) Câmara de gastrópodes preenchida por calcita mosaico; B) Preenchimento de câmara de gastrópode por calcita e lama carbonática; C-D) Micrita e fragmentos de conchas preenchendo gastrópodes; E) Preenchimento de câmara de gastrópode por calcita micro-cristalina; F) Detalhe de E mostrando a presença de valvas de ostracodes.

6.2.1.4 *Grainstone* a gastrópodes e bivalves (*Ggb*)

Microfácies composta predominantemente por fragmentos de bivalves angulosos a pouco arredondados (menores que 2 mm), cimentados por calcita espática (Fig. 8A-B). Bioclastos de gastrópodes e bivalves, maiores que 2 mm, desarticulados ocorrem em menor quantidade (< 10 %; Fig. 8C-F). Bioclastos ocorrem internamente cimentados por calcita mosaico (Fig. 8C-D). Em alguns casos, o material interno da concha foi totalmente dissolvido dando origem a porosidade intrapartícula (Fig. 8A-B). Ocasionalmente, valvas desarticuladas de bivalves com convexidade para o topo dão origem a porosidade do tipo *shelter* que foram posteriormente cimentadas por calcita mosaico (Fig. 8E-F).

6.2.1.5 *Floatstone* a bivalves e gastrópodes (*Fbg*)

Esta microfácies é formada por arcabouço de bioclastos, predominantemente bivalves e subordinadamente gastrópodes maiores que 2 mm dispersos em matriz micrítica. Grãos angulosos de quartzo tamanho silte/areia muito fina são comuns dispersos na matriz. Gastrópodes com ornamentação preservada ocorrem preenchidos por: (i) micrita e grãos de quartzo (Fig. 9A); (ii) pelóides ovais (Fig. 9B); e (iii) valvas desarticuladas de bivalves (Fig. 9C). Bivalves ocorrem predominantemente desarticulados e fragmentados (Fig. 9D). Em geral os bioclastos ocorrem recristalizados (Fig. 9A-D), porém em alguns casos, porosidade intrapartícula pode ser observada (Fig. 9A).

6.2.1.6 *Rudstone* a bivalves e gastrópodes (*Rbg*)

Microfácies compostas por arcabouço fechado de bioclastos maiores que 2 mm em matriz micrítica. Grãos angulosos de quartzo (silte/areia muito fina) são comuns dispersos na matriz. Gastrópodes e valvas desarticuladas de bivalves ocorrem maiormente recristalizadas e preenchidas pelo mesmo material que a matriz (Fig. 9E). Câmaras de gastrópodes ocorrem preenchidas por: (i) cimento espático (mosaico); e (ii) matriz (Fig. 9E). Em alguns casos, as conchas estão dissolvidas formando porosidade intrapartícula. Valvas desarticuladas de bivalves empilhadas apresentando convexidade para o topo formam níveis bem definidos separados por *Fbg* (Fig. 9F).

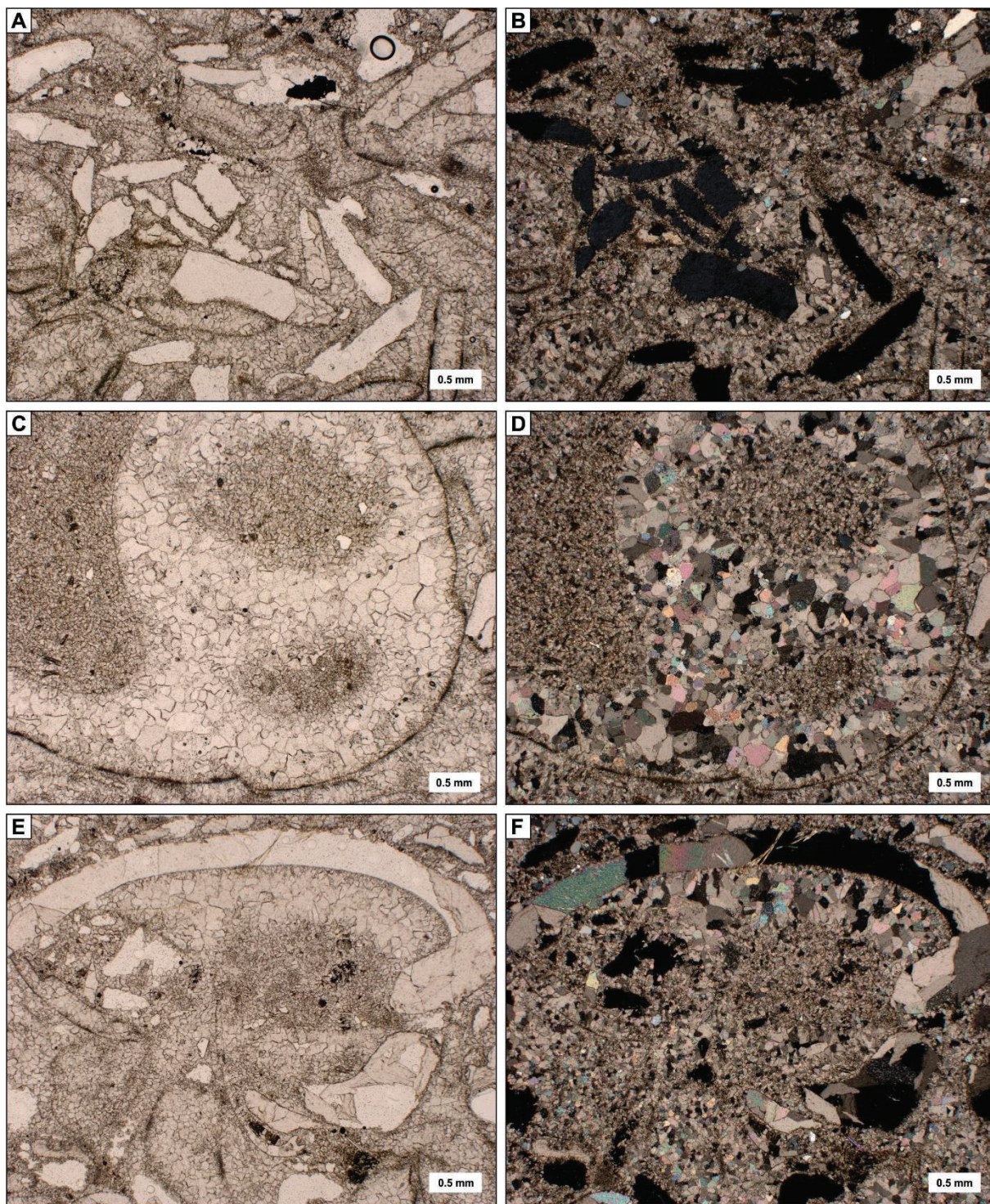


Figura 8 – *Grainstone* a gastrópodes e bivalves (luz natural e nicóis cruzados) A-B) Fragmentos de bivalves preenchidos por calcita espática e parcialmente dissolvidos; C-D) Gastrópode recrystalizado; E-F) Valva completa de bivalve recrystalizada associada a porosidade *shelter* com posterior precipitação de calcita mosaico.

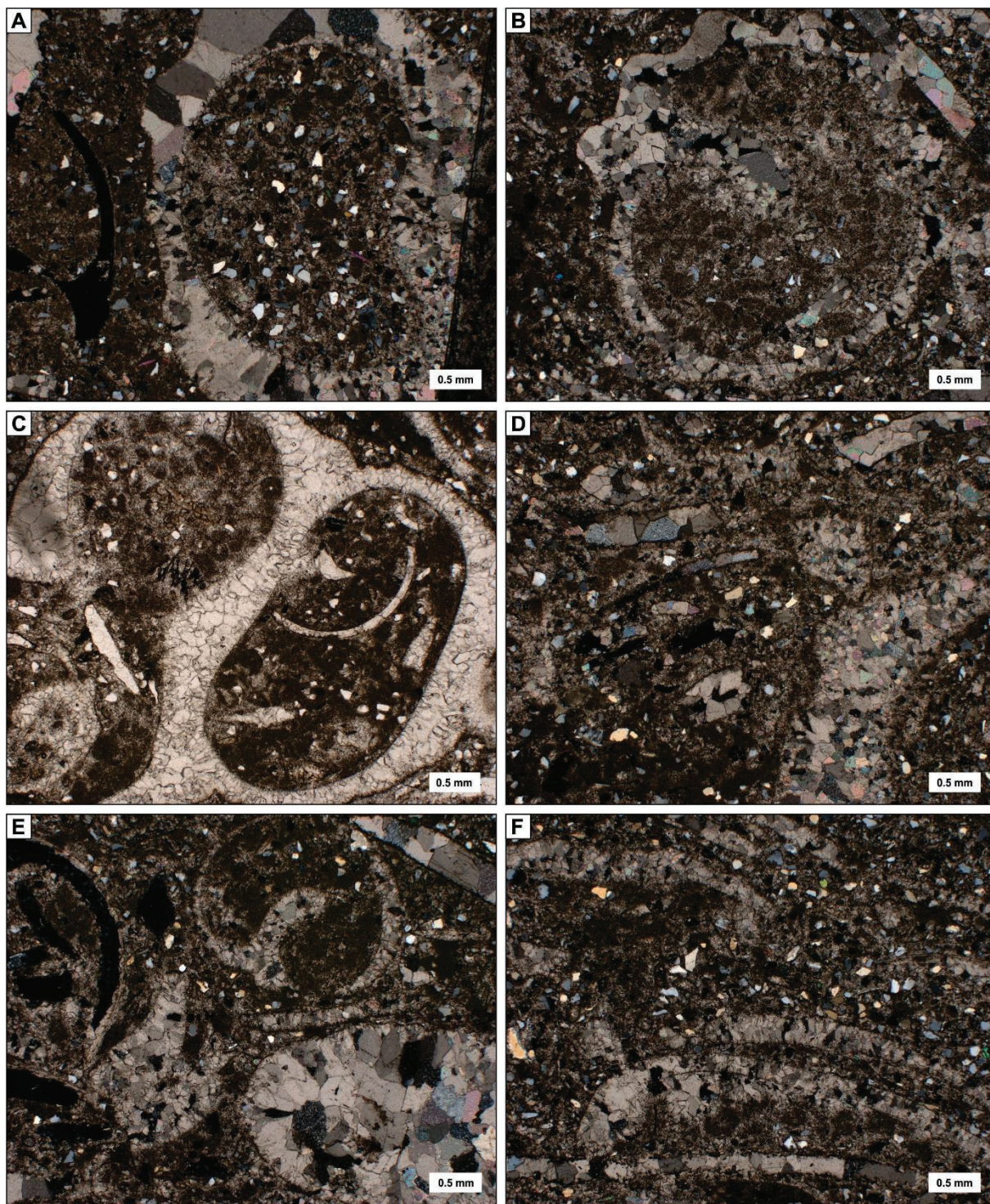


Figura 9 – *Floatstone* a bivalves e gastrópodes (A-D) e *rudstone* a bivalves e gastrópodes (E-F) (nicóis cruzados). A) Câmara de gastrópode preenchida pelo mesmo material que a matriz; B) Preenchimento de câmara de gastrópode por pelóides ovais; C) Gastrópode preenchido por pelóides ovais (parte superior) e fragmentos de bivalves (parte inferior); D) Fragmentos de valvas de bivalves; E) Alta concentração de gastrópodes e bivalves maiores que 2 mm; F) Valvas desarticuladas de bivalves empilhadas com convexidade voltada para o topo.

6.2.1.7 *Floatstone* a *Bakevelliidae* (*Fb*)

Arcabouço formado por bivalves (principalmente *Bakevelliidae*) e gastrópodes maiores que 2 mm imersos em matriz micrítica. Bivalves ocorrem predominantemente desarticulados (Fig. 10A), sem orientação preferencial de valvas (Fig. 10D). Bivalves e gastrópodes podem ocorrer tanto completos (Fig. 10A, C) quanto fragmentados (Fig. 10B, E-F). Bioclastos ocorrem predominantemente recristalizados com câmaras internas de gastrópodes preenchidas pelo mesmo material que a matriz (Fig. 10A-C). Feição característica dessa fácies é a ausência de grãos detríticos.

6.2.1.8 *Rudstone* a *Bakevelliidae* (*Rb*)

Arcabouço formado predominantemente por valvas desarticuladas de bivalves (principalmente *Bakevelliidae*) maiores que 2 mm com empacotamento fechado em matriz micrítica. Bivalves ocorrem paralelos ao acamamento com predomínio de valvas com convexidade para baixo (Fig. 11A-B). Nestes casos, é comum a ocorrência de empilhamento de valvas com gradação normal (e.g., *nesting* e *stacking*; Fig. 11C). Valvas de bivalves fragmentadas e gastrópodes ocorrem dispersos em menor quantidade. Importante feição é a preservação da estrutura interna original das conchas apesar de ocorrerem recristalizadas (Fig. 11D-F). Grãos de quartzo estão ausentes.

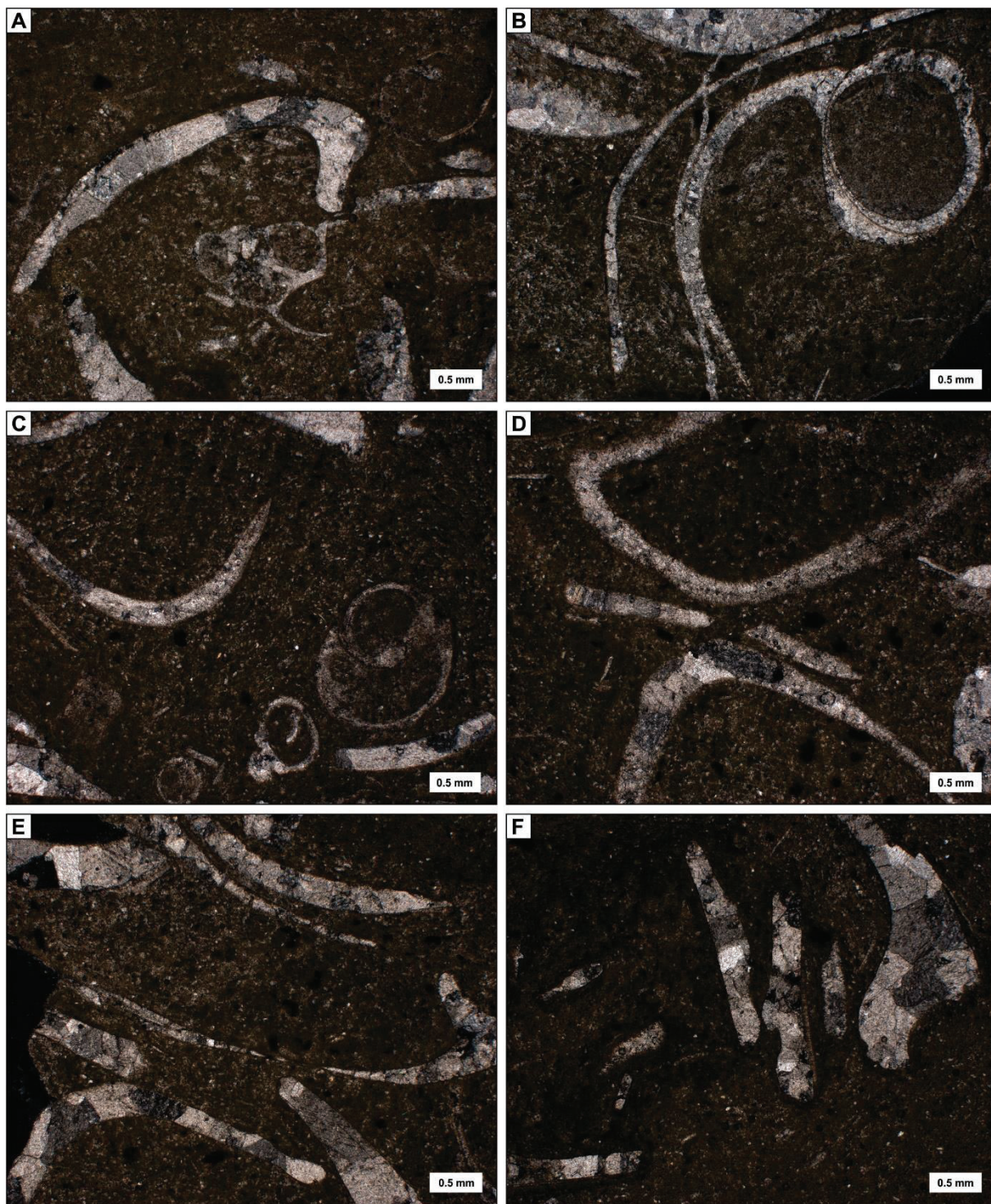


Figura 10 – *Floatstone* a Bakevelliidae (nicóis cruzados). A) Valva desarticulada de Bakevelliidae; B) Gastrópode fragmentado; C) Gastrópodes completos e fragmentos de bivalves; D) Disposição caótica de valvas de bivalves; E-F) Valvas desarticuladas e fragmentadas (arredondadas) de bivalves.

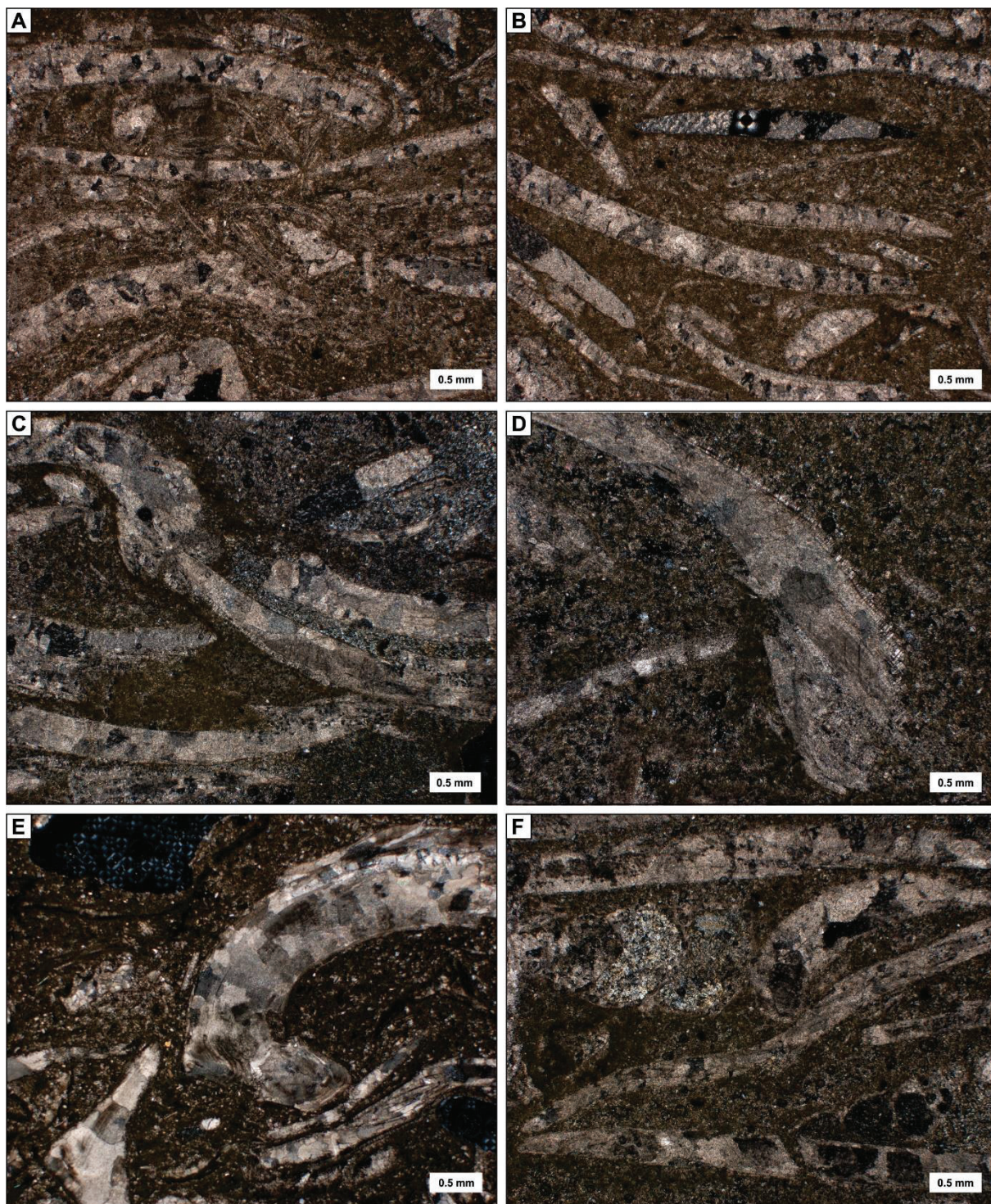


Figura 11 — *Rudstone* a *Bakevelliidae*. A-B) Valvas desarticuladas de bivalve paralelas ao acamamento; C) Valvas de bivalves empilhadas com concavidade para o topo; D-F) Valvas levemente recristalizadas mantendo microestrutura original da concha.

6.2.2 Associação de microfácies

Em escala de afloramento, a concentração de Sobradinho possui níveis internos complexos que variam de 4 cm a 17 cm de espessura aproximadamente. Sua extensão lateral é difícil de ser estabelecida devido a cobertura vegetal e pelo fato das rochas aflorarem no topo

de uma ravina. Foram reconhecidos seis níveis estratigráficos distintos (AMF-1 a AMF-6, Fig. 12) ao longo da sucessão contendo carbonatos ricos em conchas de Bakevelliidae, na seção colunar de Sobradinho. Os níveis carbonáticos analisados ocorrem intercalados com rochas siliciclásticas finas. A Figura 12 mostra a seção colunar detalhada desse intervalo.

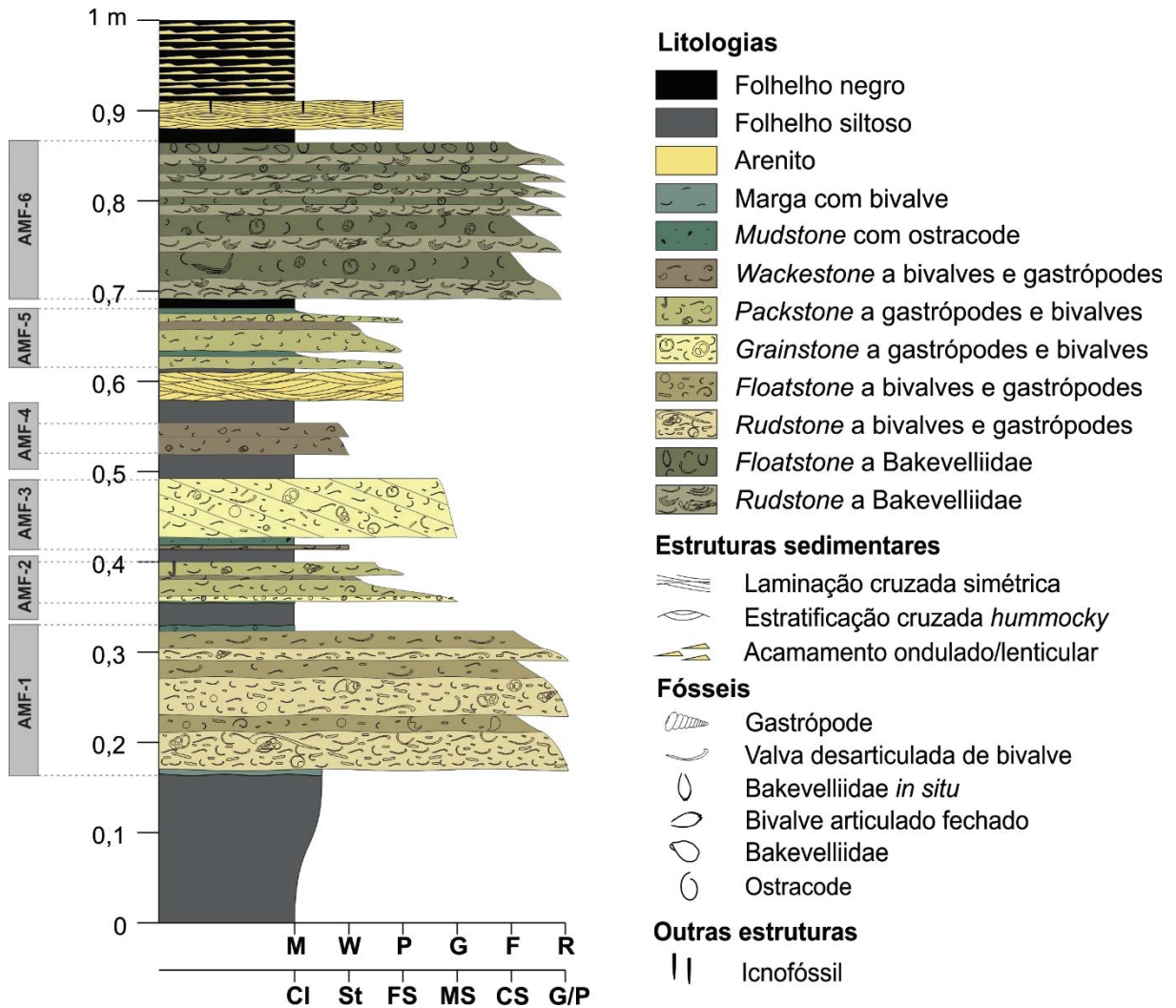


Figura 12 — Seção colunar detalhada dos níveis carbonáticos contendo conchas de Bakevelliidae na Formação Romualdo, localidade de Sobradinho, município de Jardim, Estado do Ceará.

6.2.2.1 Associação de microfácies 1 (AMF-1)

Camada com espessura de 11 a 17 cm, extensão lateral difícil de ser estabelecida devido à cobertura vegetal. Contato basal erosivo e topo ondulado. A AMF-1 é composta por duas microfácies carbonáticas que ocorrem intercaladas (Fig. 13): *Rbg* e *Fbg*. O grau de empacotamento dos bioclastos nessa associação varia de densamente empacotado (microfácies *Rbg*) a frouxo (microfácies *Fbg*). Em geral, os bioclastos apresentam seleção pobre (polimodal). Os bioclastos ocorrem predominantemente desarticulados e muito fragmentados. A porção inferior da associação de microfácies apresenta bioclastos com alto grau de desgaste por

abrasão. No entanto, algumas conchas de bivalves desarticuladas dispersas na unidade, apresentam-se completas e variam em tamanho (3 a 10,3 mm). Em relação ao plano de acamamento, os bioclastos estão arranjados paralelamente, e as valvas completas apresentam convexidade voltada para cima.

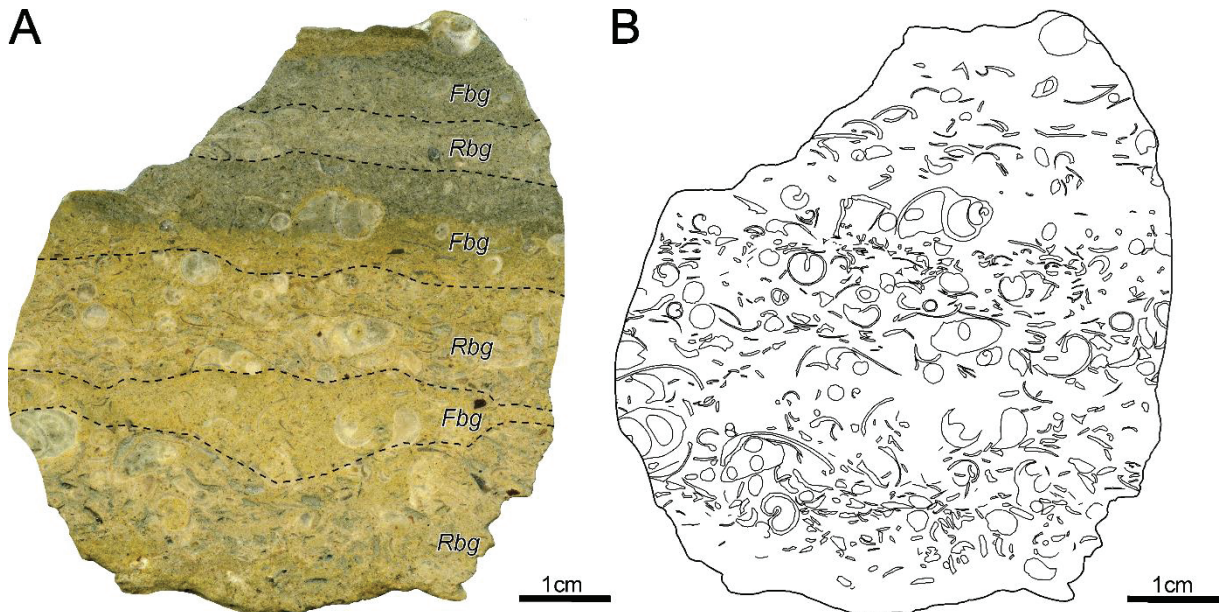


Figura 13 — Associação de microfácies 1. A) *Slab* (corte vertical da amostra) com indicação das microfácies encontradas; B) Desenho esquemático detalhando a bioturma da amostra em A.

6.2.2.2 Associação de microfácies 2 (AMF-2)

Camada com espessura de 3 a 4 cm. Contato basal e superior levemente ondulado. Na AMF-2 ocorrem quatro microfácies distintas: *Mo*, *Ggb*, *Pgb* e *Wbg* (Fig. 14). O grau de empacotamento dos bioclastos nessa unidade varia de frouxo (microfácies *Ggb*) a disperso (microfácies *Mo*, *Pgb* e *Wbg*). Os bioclastos têm seleção pobre e em geral, predominam os menores que 2 mm, ocorrendo predominantemente desarticulados e muito fragmentados. Além disso, eles também ocorrem concordantes ao acamamento. Não é possível observar um padrão quanto a convexidade das valvas dos bivalves. Feição de bioturbação em forma de J (*Arenicolites?*) (Fig. 14) é observada.

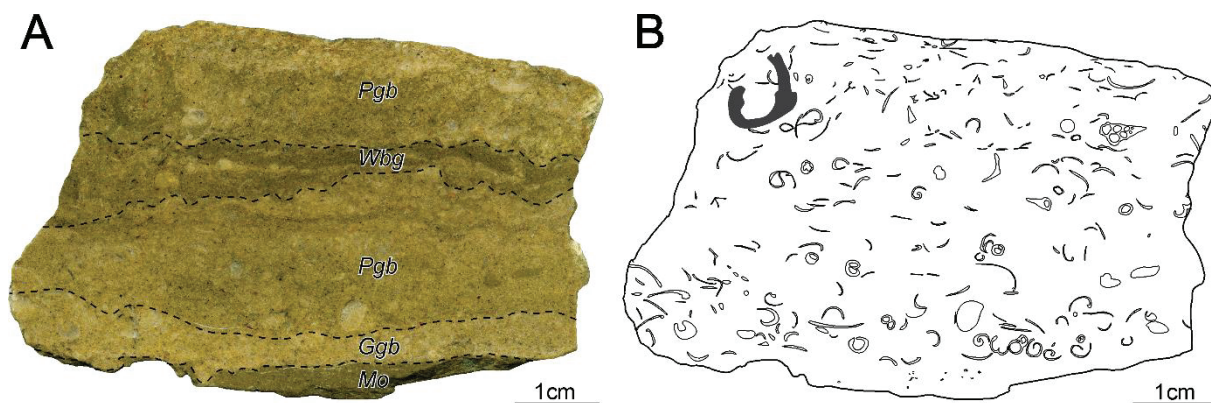


Figura 14 — Associação de microfácies 2. A) *Slab* com indicação das microfácies encontradas; B) Esquema detalhando a biotrama da amostra em A.

6.2.2.3 Associação de microfácies 3 (AMF-3)

Concentração fossilífera com espessura de 7 a 8 cm. A base da camada apresenta contato abrupto e o topo ondulado. Nessa camada ocorrem três microfácies empilhadas respectivamente da base para o topo: *Wbg*, *Mo* e *Ggb* (Fig. 15). O *grainstone* constitui *set* com base erosiva acima de *mudstone* com estrutura em chama. O grau de empacotamento dos bioclastos varia de frouxo (*Wbg*) a denso (*Ggb*). De modo geral, a seleção dos bioclastos é pobre. Em *Wbg*, os bioclastos são menores que 2 mm, enquanto em *Ggb* a maioria dos grãos é maior que 2 mm. Entretanto, alguns, como os gastrópodes, podem ultrapassar 10 mm. As valvas de bivalves, em geral apresentam alto grau de fragmentação e arestas bastante angulosas. Os bioclastos apresentam-se de forma oblíqua em relação ao plano de acamamento.

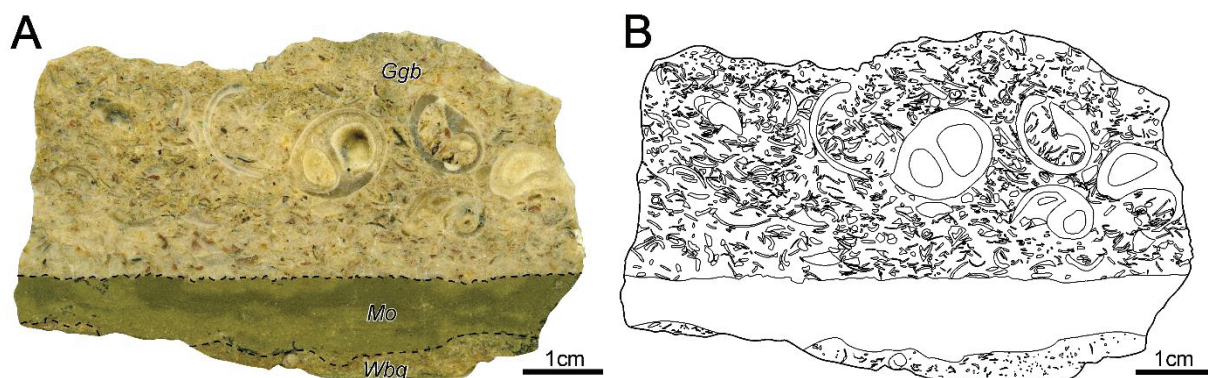


Figura 15 — Associação de microfácies 3. A) *Slab* mostrando as microfácies encontradas; B) Desenho esquemático detalhando a biotrama da amostra em A.

6.2.2.4 Associação de microfácies 4 (AMF-4)

A AMF-4 compreende uma camada de 3 cm de espessura, representada pela microfácies *Wbg* (Fig. 16). Os contatos, na base e topo da camada, são ondulados. O grau de empacotamento dos bioclastos é frouxo e sua seleção, pobre. Já a fragmentação é elevada nos bioclastos

menores que 4 mm. Os bioclastos ocorrem de forma caótica, ou seja, sem uma orientação preferencial.

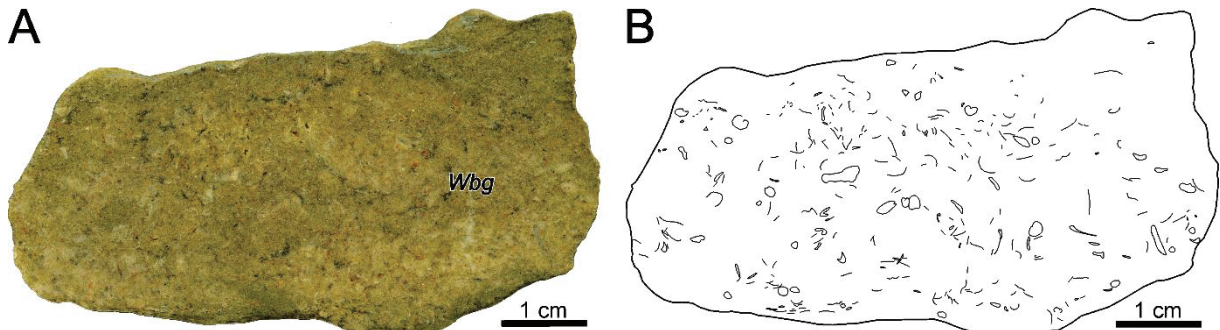


Figura 16 — Associação de microfácies 4. A) *Slab* com indicação da microfácies encontrada; B) Esquema detalhando a biotrama da amostra em A.

6.2.2.5 Associação de microfácies 5 (AMF-5)

Camada com 5 a 6 cm de espessura, com contatos (base e topo) ondulados. Nessa unidade foi possível identificar três microfácies: *Pgb*, *Mo* e *Wbg* (Fig. 17). O grau de empacotamento dos bioclastos varia de denso a frouxo. Em geral, há pouca seleção dos bioclastos, ou seja, polimodal. Na microfácies *Pgb* intermediária é possível observar bioclastos aninhados. Já na microfácies *Pgb*, mais superior, são observados bivalves articulados fechados, variando de 0,5 a 0,8 mm de largura. Exceto estes, os demais estão muito fragmentados. Em relação ao plano de acamamento, de modo geral, os bioclastos ocorrem de forma concordante, no entanto, alguns bivalves articulados ocorrem de forma oblíqua.

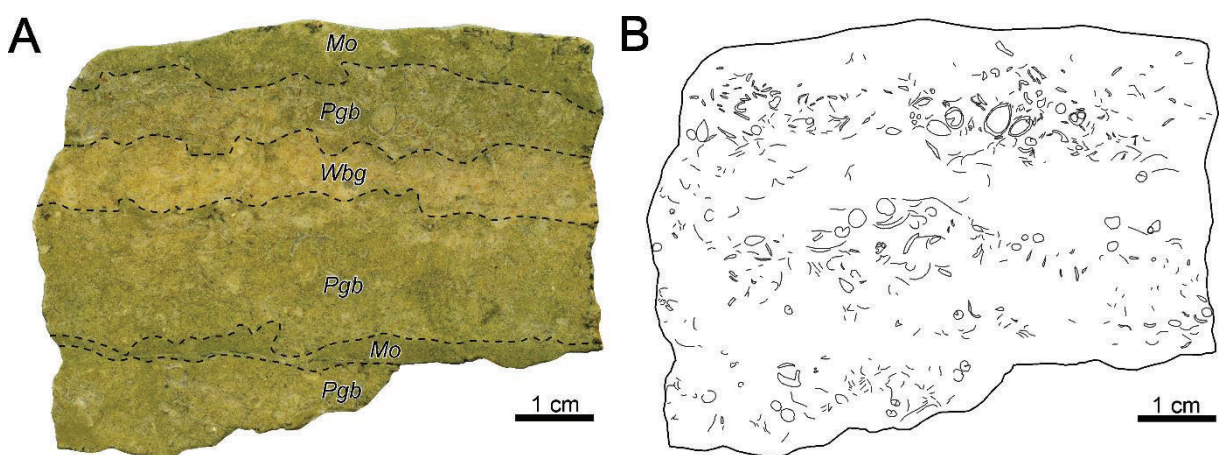


Figura 17 — Associação de microfácies 5. A) *Slab* com indicação das microfácies encontradas; B) Desenho esquemático detalhando a biotrama da amostra em A.

6.2.2.6 Associação de microfácies 6 (AMF-6)

A AMF-6 é uma camada de 15 a 17cm. O contato na base é erosivo e no topo, ondulado. Duas microfácies foram identificadas: *Fb* e *Rb* (Fig. 18). O grau de empacotamento dos

bioclastos nessa unidade, varia de denso (*Rb*) a frouxo (*Fb*). Em geral, os bioclastos têm seleção pobre (polimodais) e alguns podem chegar a até 1,5 cm de largura. Na porção inferior da unidade os bioclastos estão pouco fragmentados, é possível observar valvas de bivalves completas, mas desarticuladas e gastrópodes com ornamentação preservada. Os bioclastos, em sua grande maioria, ocorrem paralelos ao acamamento, mas é possível observar valvas em posição oblíqua. As valvas de bivalves ocorrem com a convexidade para cima e para baixo e alguma vezes ocorrem aninhadas (*nesting*) e empilhadas (*stacking*). Bivalves articulados fechados também estão presentes na AMF-6. Na microfácies *Rb* (topo da camada) estão preservados bivalves em posição de vida (Fig. 21).

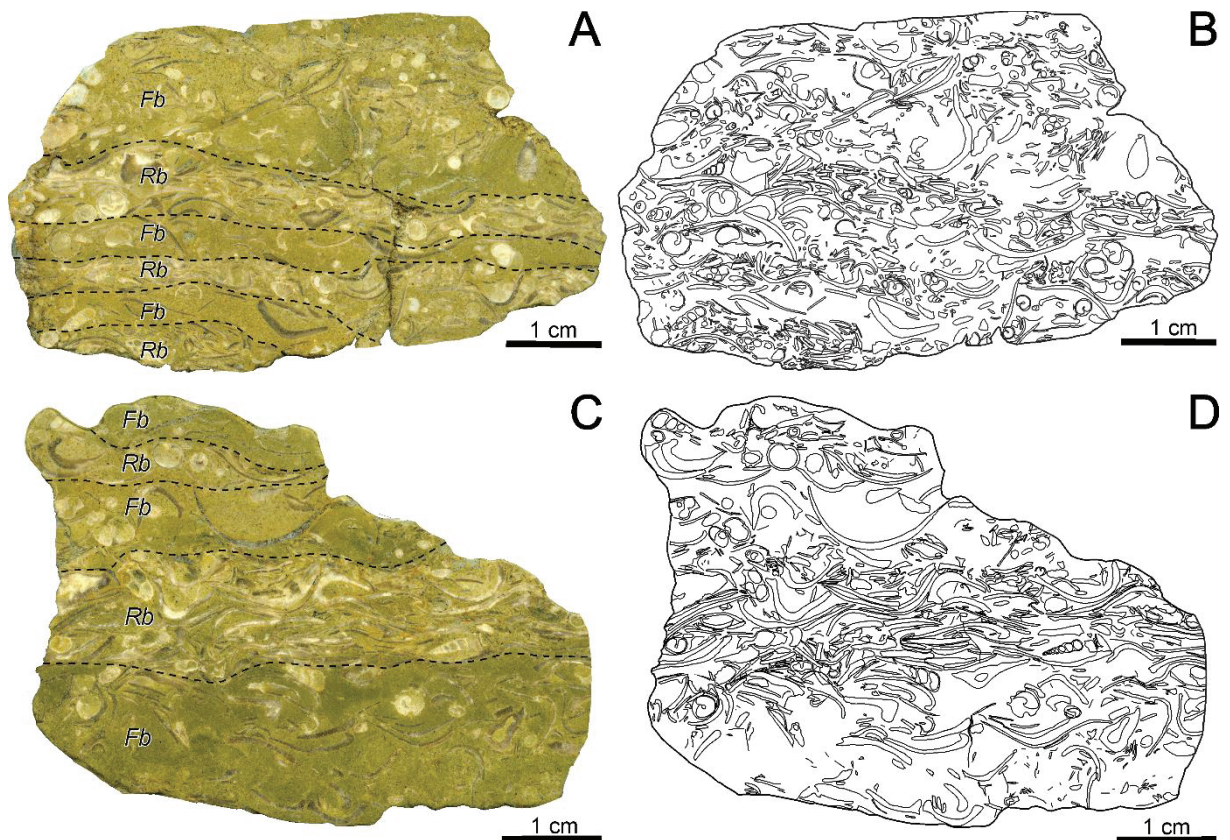


Figura 18 — Associação de microfácies 6. A) *Slab* mostrando as microfácies encontradas na porção superior da camada; B) Desenho esquemático detalhando a biotrama da amostra em A; C) *Slab* mostrando as microfácies encontradas na porção inferior da camada; D) Desenho esquemático detalhando a biotrama da amostra em C.

6.3 Sistemática paleontológica

A análise morfológica permitiu, o reconhecimento de, pelo menos, três táxons distintos, descritos e referidos como *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov. e Gen. et sp. indet. Os resultados obtidos através das análises realizadas incluem a

descrição taxonômica dos bivalves Bakevelliidae provenientes das concentrações das localidades de Sobradinho e Serra do Inácio.

Todos os resultados referentes à taxonomia destes bivalves estão apresentados em maior detalhe no Apêndice do presente documento, no qual se apresenta o principal artigo científico derivado deste estudo. No item 6.3.1. a seguir será apresentado um breve resumo do conteúdo deste artigo.

6.3.1 Novos bivalves pteriomorfos do Aptiano da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, e o breve “Mar de Bakevelliidae” do interior do nordeste do Brasil

Novos bivalves Bakevelliidae aptianos (Cretáceo Inferior) são descritos para a Formação Romualdo, Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. Os novos bivalves (*Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov., e Gen et sp. indet.), aqui descritos, indicam que a fauna de Bakevelliidae da Formação Romualdo era mais diversa do que suposto anteriormente. Carbonatos ricos em Bakevelliidae, alguns com espécimes preservados em posição de vida, são restritos a parte superior desta unidade, o mesmo intervalo estratigráfico onde calcários contendo equinodermos, gastrópodes e estromatólitos foram gerados. Esses bivalves pteriídeos foram amplamente distribuídos na Formação Romualdo, testemunhando a breve existência do “Mar de Bakevelliidae”, que inundou toda a Bacia do Araripe, no Aptiano. Notavelmente, *Aguileria romualdoensis* sp. nov. se assemelha a *A. renauxiana* do Cenomaniano da Formação Woodbine, Texas (USA). Além disso, *Aguileria dissita*, única espécie anteriormente descrita para a Bacia do Araripe, é também registrada no Aptiano-Albiano Inferior da Formação Riachuelo da Bacia de Sergipe-Alagoas. Junto com outros macroinvertebrados (i.e., gastrópodes, equinodermos e bivalves) a fauna de Bakevelliidae da Formação Romualdo, apresenta forte biocorrelação com a Formação Riachuelo, reforçando a hipótese paleogeográfica de ingresso das águas marinhas vindas de sul inundando a Bacia do Araripe, provavelmente via bacias do Recôncavo-Tucano-Jatobá. Finalmente, informações sedimentológicas, estratigráficas e paleoecológicas indicam que desaparecimento dos Bakevelliidae da Formação Romualdo está vinculado a continentalização da Bacia do Araripe, como registrado pelos depósitos da porção superior desta unidade.

7. DISCUSSÃO

7.1 Tafonomia e composição faunística

Foram estudados 361 espécimes de bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo. Na seção de Sobradinho, a fauna de Bakevelliidae é composta por: *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. (89,3%, n=199), *Aguileria romualdoensis* sp. nov. (7,1%, n=16), e Gen. et sp. indet. (3,6%, n=8). Na seção de Serra do Inácio, *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. representa 92,1% (n=127) dos espécimes, seguida por *Aguileria romualdoensis* sp. nov. (5%, n=7), e Gen. et sp. indet. (2,9%, n=4).

Nos espécimes de *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., a preservação, é principalmente representada por moldes internos (90,5%; n=316), mas moldes externos, e conchas recristalizadas também estão presentes. A deformação por compressão é muito pequena. O número de conchas desarticuladas (86,8%; n=283) é muito maior do que o de conchas articuladas (13,2%; n=43) com o predomínio de valvas esquerdas (61,9%; n=173), sobre valvas direitas (38,2%, n=107) (Fig. 19). Na seção de Sobradinho, algumas conchas de *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. são encontradas em posição de vida acima no topo das concentrações de conchas, formando pequenos *clusters*, colonizando o substrato duro (*shelly substrate*) que consiste em conchas desarticuladas previamente (Fürsich et al., 2019).

Em adição, nas amostras de mão da localidade de Sobradinho, as conchas ocorrem em associação direta com pequenos gastrópodes e bivalves (i.e., *Sinonia* e *Calva*). Na seção da localidade de Serra do Inácio, *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., também ocorre associada com bivalves (i.e., *Musculus*). Em alguns espécimes (n=4), são observadas incrustações por serpulídeos, que sugerem prolongada exposição acima da interface água sedimento (Brett & Baird, 1986). As conchas de *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. são interpretadas como elementos autóctones a parautóctones (*sensu* Kidwell et al., 1986).

As conchas de *Aguileria romualdoensis* sp. nov., ocorrem em sua maioria desarticuladas (95,6%; n=22) com a dominância de valvas direitas (100%; n=23) (Fig. 19). Somente um espécime ocorre articulado fechado. Os espécimes de *Aguileria romualdoensis* sp. nov. possuem um grau moderado de fragmentação. A fragmentação dos espécimes está possivelmente relacionada com eventos de alta energia ou prolongado transporte e retrabalhamento, próximo ao nível de base das ondas de tempo bom (Brett & Baird, 1986). O predomínio de valvas direitas de *Aguileria romualdoensis* sp. nov. nos depósitos estudados é notável e sugere que, a forma, área e peso das valvas de *Aguileria romualdoensis* sp. nov. eram provavelmente distintos, resultando em comportamentos hidráulicos diferentes.

As conchas de Gen. et sp. indet. ocorrem predominantemente desarticuladas (75%; n=12) e todas elas são representadas por valvas esquerdas (100%; n=9) (Fig. 19). Somente três espécimes estão articulados fechados; no entanto, as valvas direitas não estão completamente visíveis. *Aguilera romualdoensis* sp. nov., e Gen. et sp. indet. são interpretadas como elementos parautóctones a alóctones (*sensu* Kidwell et al., 1986).

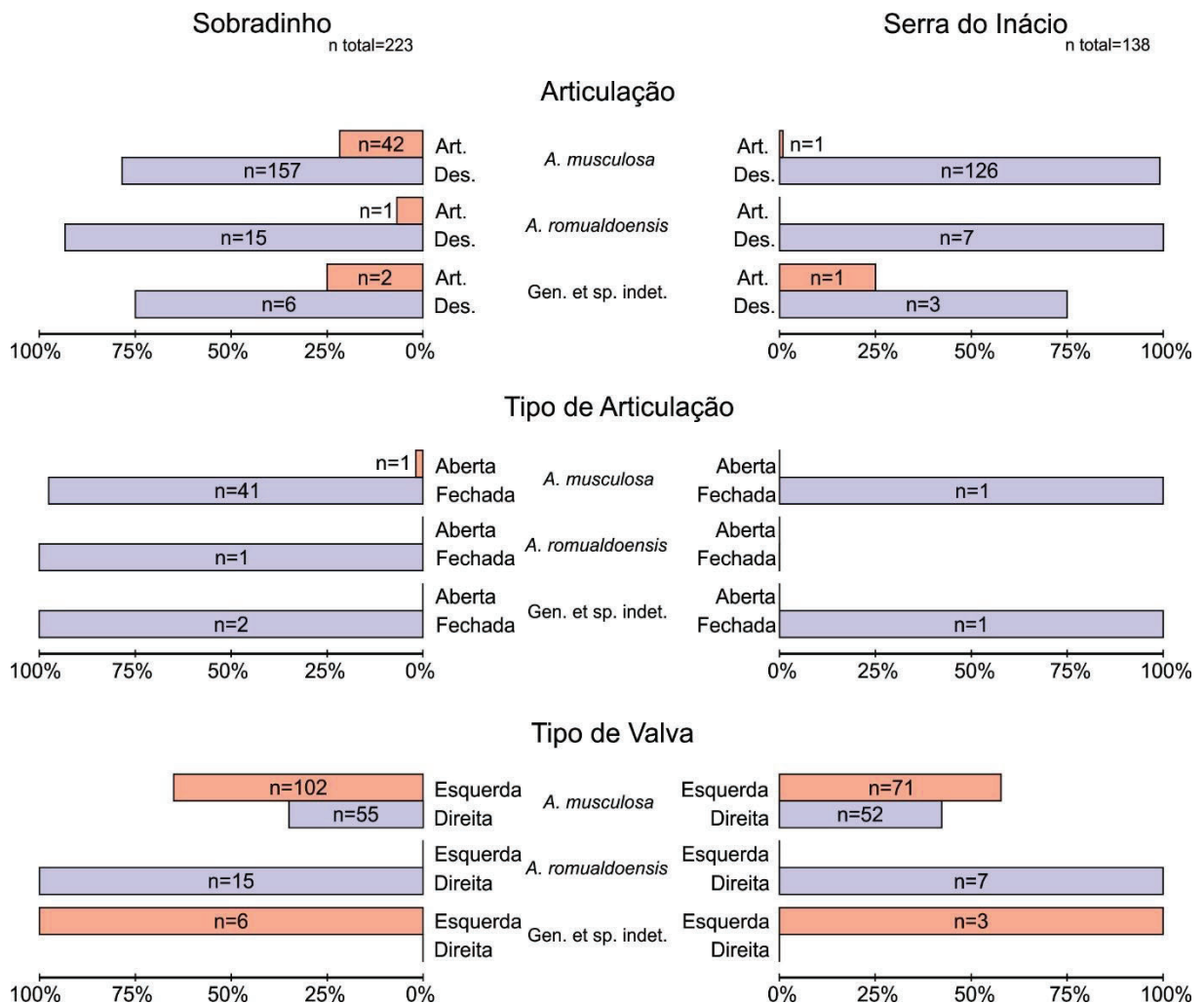


Figura 19 — Variação nos atributos tafonômicos dos bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, Brasil. Art. Articulado, Des. Desarticulado.

7.2 Gênese das concentrações bioclásticas

O estudo tafonômico de concentrações bioclásticas é amplamente utilizado em análises de bacias sedimentares, principalmente combinado com outras ferramentas, como a sedimentologia, estratigrafia e paleoecologia (Fürsich & Oschmann, 1993). Tais estudos devem considerar a incompletude do registro, onde unidades físicas nem sempre são preservadas (Kidwell, 1991, Simões & Kowalewski, 1998). Observações de campo somadas às análises de

amostras de mão, seções polidas, e lâminas petrográficas, sugerem que as concentrações da localidade de Sobradinho tiveram história deposicional longa e complexa. O modelo deposicional proposto nesta dissertação para as concentrações de Sobradinho, será brevemente discutido mais adiante e está maiormente fundamentado no modelo de Fürsich & Oschmann (1993).

7.2.1 Trabalhos anteriores

Rochas carbonáticas compostas predominantemente por bioclastos de bivalves e gastrópodes ocorrem no topo da Formação Romualdo e afloram ao longo de toda Bacia do Araripe (Assine et al., 2014; Custódio, et al., 2017). Estas rochas indicam deposição em ambiente marinho raso dominado por tempestade (Custódio et al., 2017) e foram classificadas em quatro diferentes tipos de concentrações (Sales, 2005): (i) tempestito proximal; (ii) tempestito distal; (iii) resíduo transgressivo; e (iv) concentrações primariamente biogênicas.

A seção de Sobradinho representa a porção mais distal da Formação Romualdo (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). Nesta seção, as concentrações bioclásticas foram interpretadas tanto como tempestitos distais (Sales, 2005) como tempestitos proximais (Fürsich et al., 2019). Estas concentrações, são tipicamente amalgamadas e sugerem a existência de processos de retrabalhamento em ampla escala (Fürsich et al., 2019). O grau de abrasão e a fragmentação das conchas é moderado e a presença de elementos de diferentes formas e tamanhos indica ausência de seleção por transporte (Fürsich et al., 2019). Bioclastos de tamanho pequeno e muito fragmentados sugerem proveniência situada acima do nível de base das ondas de tempo bom (Fürsich et al., 2019).

A gênese das concentrações de Sobradinho envolveu diferentes fases (vide fig. 9, em Fürsich et al., 2019): (i) deposição de conchas retrabalhadas localmente; (ii) colonização do substrato por *Sinonia*; (iii) repetidas fases de colonização e retrabalhamento de *Bakevelliidae*; e (iv) soterramento por areia. Os altos percentuais de espécimes articulados fechados de *Bakevelliidae* e *Sinonia* nestas concentrações estão claramente relacionados a fases episódicas de sedimentação rápida, sufocando e matando populações vivas, e muitas vezes preservando indivíduos em suas posições de vida (Fürsich et al., 2019). Tais características sugerem que os bioclastos foram provavelmente concentrados por ondas de tempestade proximais (Fürsich et al., 2019) e não por concentrações abaixo do nível de base de ondas de tempestade (Sales, 2005).

7.2.2 Modelo deposicional

Seis camadas carbonáticas (AMF-1 a AMF-6) com contatos irregulares, separadas por finas camadas de folhelho siltoso (Fig. 12), foram reconhecidas com base em atributos sedimentológicos, petrográficos e tafonômicos. Estas concentrações revelam história deposicional complexa, expressas em: (i) mistura de conchas com diferentes assinaturas tafonômicas; e (ii) mistura de espécies de moluscos de diferentes sub-ambientes. Desenho esquemático mostrando os possíveis processos responsáveis pela geração dos variados tipos de concentrações e a interpretação para cada associação de microfácies é apresentada na figura 20.

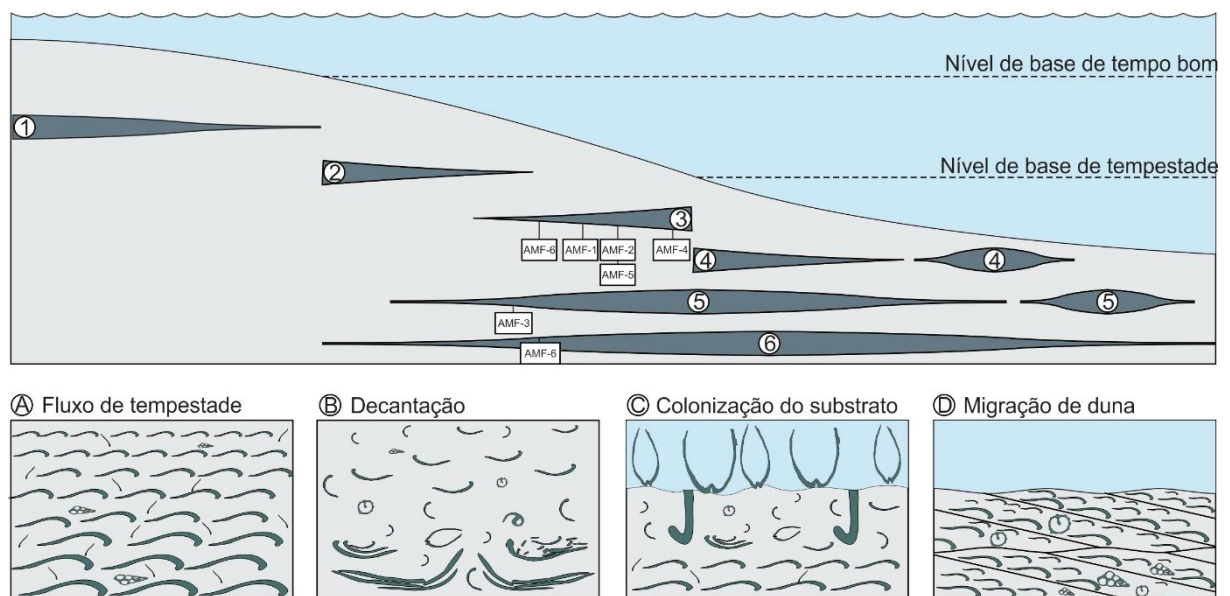


Figura 20 — Modelo mostrando os processos (A-D) envolvidos na gênese das diferentes associações de microfácies, assim como os diferentes tipos de concentrações esqueléticas identificados (*sensu* Fürsich & Oschmann). Explicação: (1) Concentrações geradas por ondas de tempo bom; (2) Concentrações geradas por ondas de tempestade; (3) Tempestito proximal; (4) Tempestito distal; (5) Concentrações por corrente e (6) Concentrações primariamente biogênicas. Modificado de Fürsich & Oschmann (1993).

A deposição da AMF-1 marca o início das concentrações bioclásticas. A existência de três níveis com gradação normal sugere distintos eventos de tempestade (T_1 , T_2 e T_3 ; Fig. 22) e são interpretados como tempestitos proximais (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993). O predomínio das microfácies *Rbg* e *Fbg* indica deposição em ambientes de alta energia com predomínio de fluxos de tempestade. A existência de conchas empilhadas com convexidade para baixo indicam deposição do material em suspensão e conseqüentemente diminuição do nível de energia do sistema. Por sua vez, as conchas com convexidade para cima apontam uma reorientação conduzida por correntes de fundo (Fürsich & Oschmann, 1993). A existência de (i) fragmentos de conchas (alto retrabalhamento e transporte), (ii) conchas articuladas preenchidas por calcita espática (eventos de alta energia arrancando os bioclastos enquanto

vivos de seu sítio deposicional original), e (iii) gastrópodes com ornamentação (pouco ou nenhum retrabalhamento e transporte), sugerem mistura de elementos com distintas história tafonômicas.

A AMF-2 representa pelo menos dois fluxos induzidos por eventos de tempestade (T₄ e T₅; Fig. 22). A concentração é interpretada como tempestito proximal (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993). Os processos que geraram a AMF-2 são basicamente os mesmos que geraram a concentração em AMF-1; no entanto, a granulação dos bioclastos é menor e as microfácies identificadas são *packstone* e *wackestone*. As conchas estão organizadas em sucessões com gradação normal. A base das sucessões (*packstone*) apresenta conchas com características condizentes a remobilização e deposição por fluxo de tempestade. Por outro lado, o topo das sucessões (*wackestone*), é sugestivo de diminuição do nível de energia do sistema com decantação das frações mais finas.

Com o fim do evento de tempestade e a subsequente diminuição na energia do sistema houve a colonização do substrato, como indicado pela presença de bioturbação no topo da camada. A AMF-2 foi gerada provavelmente em uma posição batimétrica um pouco mais profunda em relação a AMF-1 devido à presença de bioclastos em frações mais finas e maior quantidade de lama carbonática. A presença de bioclastos mais fragmentados e com arestas mais arredondadas sugere que os processos energéticos a que esses bioclastos foram submetidos foram mais duradouros que na concentração AMF-1.

A AMF-3 é distinta das associações anteriores (AMF-1 e AMF-2) pela ausência de matriz entre os bioclastos e pela presença de estrutura sedimentar com gradação normal dentro dos *foresets* (*grainstone* com estratificação cruzada planar) (Fig. 22). A cimentação do *grainstone* provavelmente ocorreu em três etapas: (i) cimentação da porosidade interpartícula e formação de porosidade do tipo *shelter*; (ii) recristalização das conchas e preenchimento da porosidade *shelter* por calcita mosaico; e (iii) dissolução parcial de conchas dando origem a porosidade intrapartícula. A microfácies *mudstone* é característica de decantação de lama carbonática em ambiente sem energia. A presença de ostracodes desarticulados e muitos grãos de quartzo angulosos indica a existência de ocasionais correntes trazendo sedimentos de águas mais rasas. As valvas de ostracodes ocorrem cimentadas externamente por franja acicular (aragonita ou calcita magnésiana), comum cimento marinho. O nível de *grainstone* é interpretado como depósito de migração unidirecional de dunas 2D sob regime de fluxo inferior. O alto grau de abrasão e fragmentação dos bioclastos indica condições de transporte prolongados e/ou longos intervalos de exposição em ambientes de alta energia. Tais

características sugere que a AMF-3 consiste em concentração gerada por corrente de longa duração acima do nível de base das ondas de tempestade (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993).

A AMF-4 é caracterizada por dois níveis de *wackestone* com aumento na proporção lama/bioclasto em direção ao topo de cada nível. Esta característica assim como a irregularidade da base da camada e estruturas de sobrecarga acima dos folhelhos com estrutura em chama sugerem a existência de dois pulsos de alta energia gerados por diferentes eventos de tempestade (denominados de T₆ e T₇; Fig. 22). Estes pulsos são caracterizados pela existência de material (lama e bioclastos) arrancado do substrato e posto em suspensão na coluna de água, sendo posteriormente depositados. A presença de grandes quantidades de grãos angulosos de quartzo sugere *input* de material detrítico alóctone. A concentração é interpretada como um tempestito proximal, provavelmente formado em batimetria um pouco mais funda do que nas associações AMF-1 e AMF-2 dada a presença de frações mais finas (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993).

A AMF-5 apresenta história deposicional semelhante à AMF-2. Os processos que deram origem a concentração AMF-5 envolvem materiais remobilizados por fluxos de tempestades e posterior deposição quando houve diminuição do nível de energia do sistema e decantação dos bioclastos (aninhamento de conchas). São reconhecidos pelo menos três eventos de tempestade distintos (denominados de T₈, T₉ e T₁₀; Fig. 22), caracterizando uma concentração de tempestito proximal (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993). Os diferentes preenchimentos das câmaras de gastrópodes por materiais diferentes da matriz sugerem que estes bioclastos são elementos alóctones, ou seja, elementos arrancados de seu sítio deposicional original. A existência de bivalves articulados fechados, oblíquos ao acamamento, sugere que estes foram arrancados enquanto vivos do substrato e re-depositados pelos fluxos de tempestade e posteriormente reorientados por corrente ou até mesmo por bioturbação.

A AMF-6 apresenta a história tafonômica mais complexa dentre as concentrações da localidade de Sobradinho. Esta associação de microfácies é interpretada como tempestito proximal, exceto pelo topo da unidade, que constitui concentração primariamente biogênica (Kidwell & Bosence, 1991; *sensu* Fürsich & Oschmann, 1993). Características como base erosiva, gradação normal, biofábrica apresentando conchas imbricadas, aninhada e empilhadas, e orientação de valvas com convexidade para baixo sugerem fortemente influência de tempestades (Fürsich & Oschmann, 1986). As características do arcabouço indicam ainda a existência de retrabalhamento de elementos parautóctones e alóctones

A história deposicional da concentração AMF-6 envolve períodos de baixa a ausente taxa de sedimentação interrompidos por eventos de alta energia (tempestade). Essa camada representa pelo menos cinco eventos de tempestade (T₁₁-T₁₅; Fig. 22). Desta forma, a história deposicional da AMF-6 envolveu: (i) o estabelecimento de comunidades de bivalves de epifauna sobre substrato duro previamente gerado por eventos de tempestade trazendo bioclastos de áreas mais proximais; e (ii) erosão e re-deposição por eventos de tempestade e incorporação de outros bioclastos. Após a cimentação precoce das acumulações de conchas (*floatstone* ou *rudstone*) uma nova comunidade se estabelecia para colonizar novamente o substrato. Deve ser ressaltado, que nesse momento de colonização, as taxas de sedimentação deveriam ser muito baixas ou nulas, pois não seria possível animais desse tipo viverem num ambiente com intensa decantação de finos. O processo de estabelecimento da comunidade de bivalves de epifauna sob substrato duro e subsequente erosão e re-deposição por eventos de tempestade e incorporação de outros bioclastos se repetiu pelo menos cinco vezes ao longo da deposição da AMF-6.

A presença de conchas de *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. em posição de vida no topo da AMF-6 (Fig. 21) indica que estes bivalves gregários que colonizavam o substrato duro (rico em conchas), morreram sufocados rapidamente pela intensa decantação de finos, fruto de evento de tempestade que os soterrou (Fürsich, 1980). A ausência de correntes de fundo devido a mudança do sítio deposicional para baixo do nível de base de ondas de tempestade, provavelmente favoreceu a preservação final dos bivalves em posição de vida do topo da AMF-6 (ver exemplo análogo em Simões & Torello, 2003).

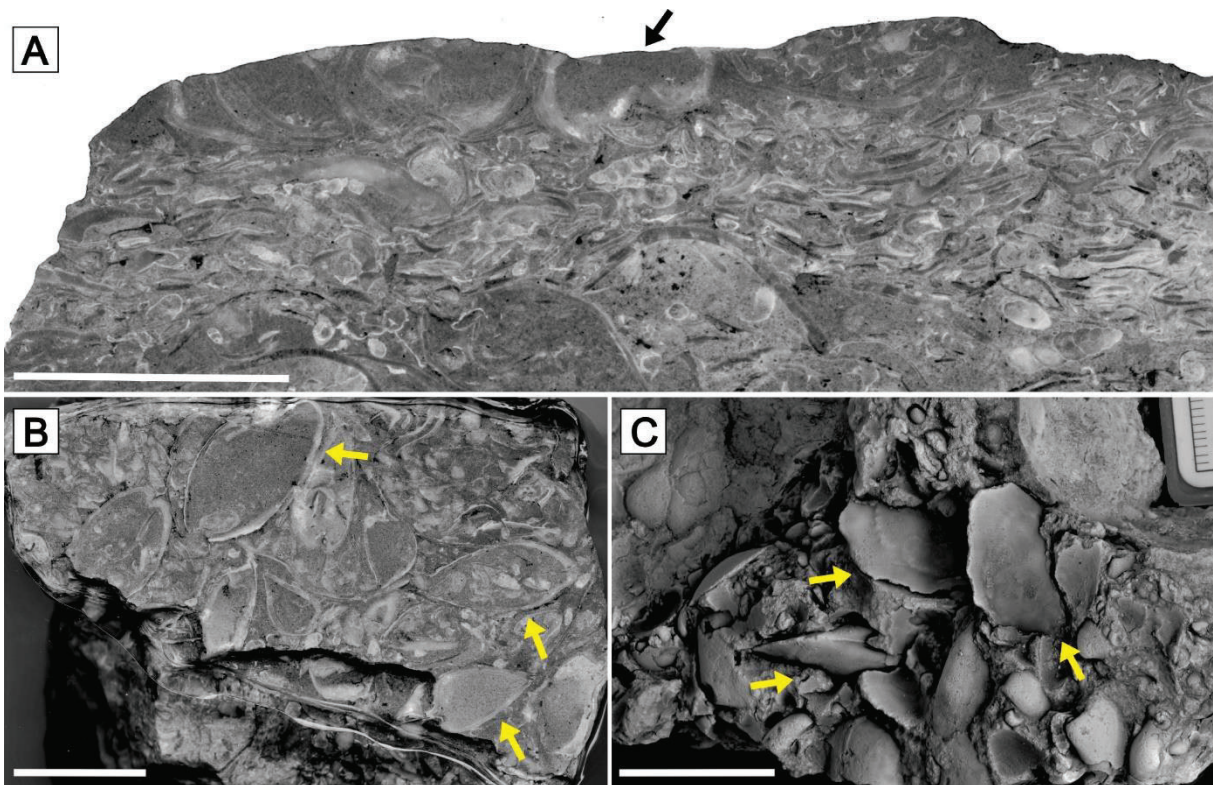


Figura 21 — *Araripevella musculosa* gen et sp. nov. preservada em posição de vida, no topo das concentrações fossilíferas da seção colunar da localidade de Sobradinho. A) Seção polida em perfil; B) Seção polida, vista em planta; C) Amostra vista em planta. Escala: 2 cm.

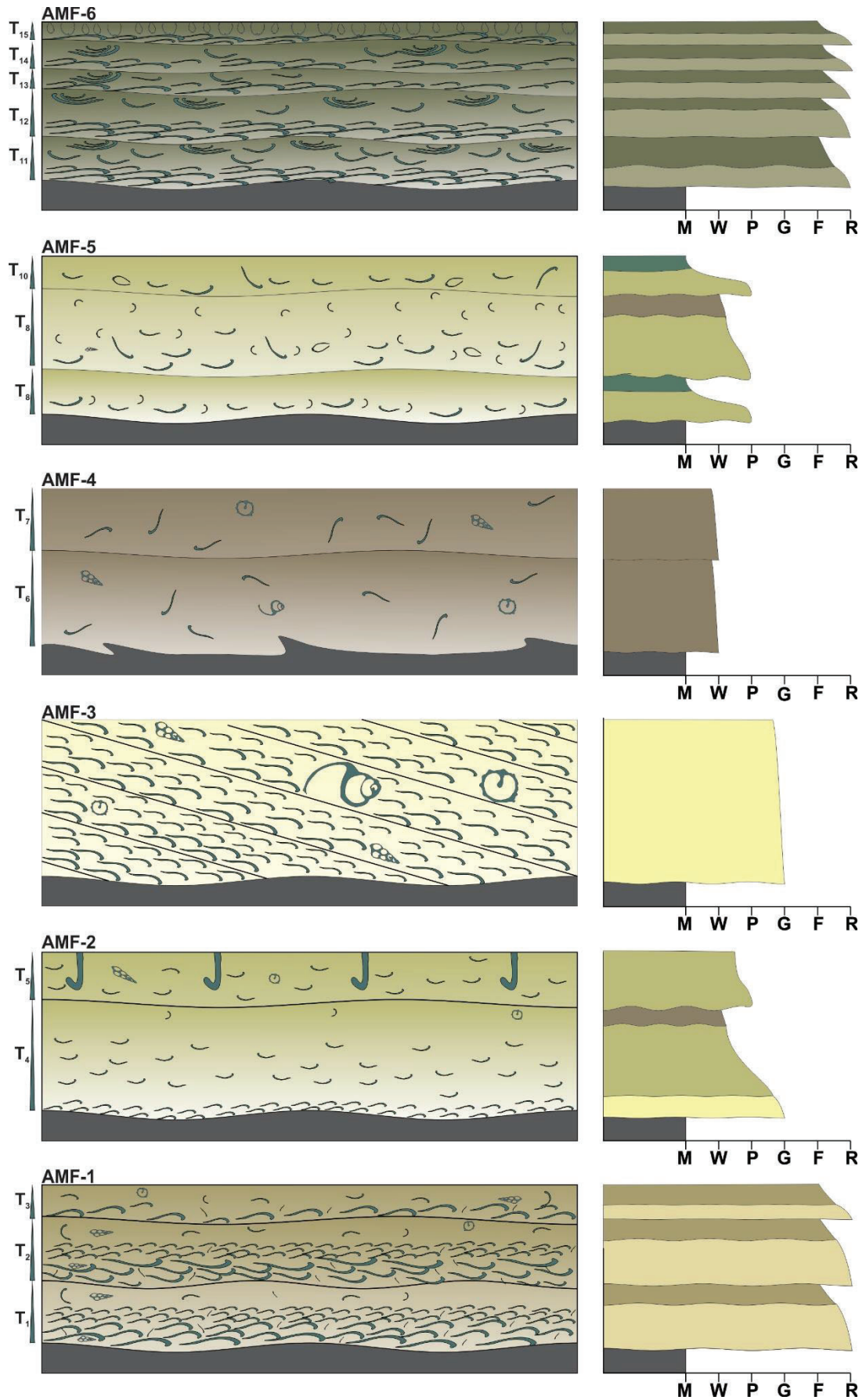


Figura 22 — Modelo genético para origem das concentrações fossilíferas com Bakevelliidae da seção colunar da localidade de Sobradinho, Formação Romualdo.

7.3 *Paleoecologia*

Os bivalves *Bakevelliidae* prosperaram em águas marinhas desde o início do Carbonífero e foram extintos no Eoceno, portanto, comparações com representantes atuais não são possíveis (Aberhan & Muster, 1997). Estes bivalves foram filtradores e viviam fixados ao fundo por bissos, mas as diferentes formas das conchas resultam da adoção de diferentes modos de vida (Muster, 1995; Seilacher, 1984).

Conchas modioliformes, alongadas ou lanceoladas, com área ligamentar relativamente longa, aurícula anterior bem desenvolvida, lobada e margem ventral convexa (i.e., *Aguilerella*, *Gervillella*, *Virgellia*) são classificadas como endobissadas de semi-infauna e substrato lamoso (Seilacher, 1984; Muster, 1995). Espécies com conchas alongadas (i.e., *Gervillia*) e área ligamentar curta são interpretadas como formas epibissadas, que colonizaram substratos duros e estáveis (Seilacher, 1984; Muster, 1995).

As espécies dos gêneros *Bakevellia* e *Aguileria* são muito similares em sua morfologia externa, já que ambas apresentam conchas quase equivalves, geralmente trapezoidais ou romboidais não muito alongadas, com aurícula anterior pequena e asa posterior arredondada ou pontiaguda (Cox, 1969; Muster, 1995). Portanto, são interpretadas como formas de semi-infauna, endobissadas (Muster, 1995). De acordo com Stanley (1972), as características morfológicas externas de *Bakevellia*, como, por exemplo, o sinus bissal raso e a aurícula anterior à moda de *Modiolus* (Mytilidae), verificadas também em *Aguileria*, sugerem hábito de vida semelhante, ou seja, endobissado com o plano de comissura quase vertical em relação ao substrato.

A morfologia externa das valvas de *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov., caracterizada por condição levemente inequivalve, além de aurícula anterior pequena e bem definida, área da charneira alongada e margem ventral sinuosa, à semelhança dos Mytilidae (vide Stanley, 1970, 1972; Seilacher, 1984), sugerem hábito de vida de semi-infauna, endobissada, com o plano de comissura inclinado em relação a substrato fino (Seilacher, 1984). No entanto, a concha de *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov. apresenta sua largura máxima mais próxima a margem anterior, característica dos Mytilidae epifaunais (Stanley, 1970). Dessa forma, *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov., não se encaixa satisfatoriamente em nenhum dos modelos paleoautoecológicos conhecidos até o momento. Porém, nos calcários da seção de Sobradinho, *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov., ocorre em posição de vida imediatamente acima dos *rudstones* do topo, constituindo pequenos aglomerados, recobertos e preenchidos por sedimento fino. Esta é uma evidência direta de que *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov.,

possuía um hábito de vida epibissado quase vertical, colonizando substratos duros (*shelly*) (Fig. 21).

A interpretação do modo de vida de *Aguileria romualdoensis* sp. nov., com base na anatomia funcional da concha, é mais complexa do que a de *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. isso porque apenas as valvas direitas de *Aguileria romualdoensis* sp. nov., estão preservadas nas concentrações fossilíferas examinadas. Desse modo, existe um claro viés de preservação, o que sugere que as valvas desta espécie são desiguais, podendo variar em um ou mais atributos morfológicos (i.e., quanto à forma, convexidade, espessura, peso). De fato, como amplamente sabido, desvio na proporção 50/50 entre valvas direitas e esquerdas de moluscos bivalves e braquiópodes, decorre tipicamente do transporte diferencial de uma das valvas (McKittrick, 1987; Simões et al., 2005) ou, mais raramente, da predação. Como sinais de predação são inexistentes no material estudado é plausível supor que diferenças na morfologia da concha, condicionem o transporte hidráulico distintos entre as valvas de *Aguileria romualdoensis* sp. nov. Muster (1995) interpretou *Aguileria* como um bivalve de semi-infauna., assim, *Aguileria romualdoensis* sp. nov., deve ter tido hábito de vida similar, mas parcialmente enterrada e mais apoiada (reclinada) em uma das valvas, produzindo diferenças na forma e outros atributos da concha.

Nas seções colunares de Sobradinho e Serra do Inácio, as três espécies ocorrem juntas, ou seja, no mesmo plano de acamamento. No entanto, até agora, somente *Araripevella musculosa* gen et sp. nov. ocorre preservada em posição de vida. Portanto, não é possível afirmar que as três espécies realmente conviveram. De qualquer forma, sabe-se que comumente diferentes tipos de Bakevelliidae viviam associados em um mesmo ambiente (ver Damborenea, 1987; Aberhan & Muster, 1997; Lazo, 2003).

Finalmente, *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov., e Gen. et sp. indet. ocorrem associadas a conchas de *Sinonia* sp., *Calva* sp., além de gastrópodes cassiopídeos e ceritídeos, dentre outros. Embora ocorrendo em um mesmo plano de acamamento, a condição tafonômica destes elementos é, em geral, muito variável. Por exemplo, conchas de *Sinonia* sp. são encontradas em posição de vida, mas não em associação direta com Bakevelliidae *in situ* (Fürsich et al., 2019). Portanto, nas concentrações examinadas haveria mistura de elementos autóctones, parautóctones e até alóctones, mostrando a origem complexa das concentrações fossilíferas.

8. CONCLUSÕES

(i) Seis associações de microfácies apresentando gradação normal, foram reconhecidas na seção colunar da localidade de Sobradinho, cada uma separada por finas camadas de folhelhos siltosos com limites irregulares, marcando a alternância entre deposição de rochas siliciclásticas e carbonáticas. Em determinadas fases, as conchas de Bakevelliidae foram suficientemente abundantes para gerar *rudstones* e *floatstones*;

(ii) As concentrações ricas em Bakevelliidae são constituídas de oito microfácies carbonáticas distintas: *Mudstone* com ostracodes, *Wackestone* a bivalve e gastrópode, *Packstone* a gastrópodes e bivalves, *Grainstone* a gastrópodes e bivalves, *Floatstone* a bivalves e gastrópodes, *Rudstone* a bivalves e gastrópodes, *Floatstone* a Bakevelliidae, e *Rudstone* a Bakevelliidae. A variedade de microfácies carbonáticas é indicativa de variações nas condições associadas a gêneses das concentrações (e.g., tamanho dos bioclastos, energia do sistema);

(iii) As camadas carbonáticas da seção colunar da localidade de Sobradinho, parte superior da Formação Romualdo, compreendem três tipos de concentrações esqueléticas: (i) tempestito proximal, (ii) concentração por corrente, (iii) concentração primariamente biogênica (*sensu* Fürsich & Oschmann, 1993). As associações de microfácies AMF-1, AMF-2, AMF-4, AMF-5 e AMF-6 correspondem às concentrações de tempestitos proximais, já a AMF-3, está relacionada à concentração por corrente, e o topo da AMF-6 corresponde à concentração primariamente biogênica;

(iv) Os Bakevelliidae preservados em posição de vida, no *floatstone*, referente a última camada de calcário no topo da seção colunar de Sobradinho, com as conchas articuladas fechadas preenchidas por lama carbonática, sugerem que morreram sufocados pela rápida decantação de finos, associada a eventos episódicos de alta energia. A preservação *in situ* de elementos de epifauna implica na mudança do nível de base, já que agentes tracionais, se presentes, teriam remobilizado as conchas;

(v) A análise taxonômica de 361 espécimes de bivalves Bakevelliidae indica que, pelo menos, três táxons estão presentes na Formação Romualdo. Destes, um corresponde a um gênero novo (*Araripevella* gen. nov.), tendo *A. musculosa* sp. nov., como espécie-tipo. O outro táxon é

Aguileria romualdoensis sp. nov. Finalmente, um dos elementos permanece indeterminado (Gen. et sp. indet.) até que material com melhor preservação esteja disponível para estudo. Portanto, juntamente com *Aguileria dissita* (Pereira et al., 2015), o outro Bakevelliidae descrito, a malacofauna de bivalves pterióides da Formação Romualdo é mais diversa do que anteriormente conhecido;

(vi) Dados de morfologia funcional, combinados com os tafonômicos e sedimentológicos, sugerem que as espécies de Bakevelliidae que colonizaram a Bacia do Araripe no Aptiano apresentaram modos de vida distintos. *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. foi uma forma epibissada com preferência por substratos duros, bioclásticos, *Aguileria romualdoensis* sp. nov., por sua vez, foi uma espécie de semi-infauna, endobissada, vivendo possivelmente reclinada em uma das valvas, em substrato fino;

(vii) Os calcários ricos em conchas de Bakevelliidae foram encontrados na Formação Romualdo ao longo de toda a faixa aflorante da bacia. Isso indica que águas marinhas totalmente oxigenadas inundaram toda a Bacia do Araripe (= Mar de Bakevelliidae) à época de deposição do intervalo estudado;

(viii) O intervalo carbonático da parte superior da Formação Romualdo com concentrações ricas em Bakevelliidae, bem representado na seção colunar de Sobradinho, pode ser seguramente correlacionável com o intervalo estratigráfico da parte superior desta unidade contendo folhelhos e calcários com *Paraglauconia*, como na seção de Serra do Mãozinha e os calcários com gastrópodes e Bakevelliidae da seção colunar de Estiva. Na borda oeste da bacia, o intervalo é representado por calcários contendo equinóides e Bakevelliidae, como os da região de Araripina, Estado de Pernambuco (ver Pereira et al., 2015; 2017), bem como ao campo de estromatólitos da região de Simões, Estado do Piauí (Varejão et al., 2019). Esse intervalo estratigráfico e seus macroinvertebrados bentônicos, atestam claramente a presença de águas marinhas em toda a Bacia do Araripe;

(ix) *Aguileria romualdoensis* sp. nov. se assemelha com *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1842, em Muster, 1995, p. 20) do Cenomaniano da Formação Woodbine, Texas (US) (Stephenson, 1952). Além disso, *Aguileria dissita* dos calcarenitos da margem oeste da Bacia do Araripe, Estado de Pernambuco, é também encontrada na Formação Riachuelo, Bacia de Sergipe-

Alagoas (White, 1887a; Maury, 1936). Portanto, duas espécies de Bakevelliidae do gênero *Aguileria* são compartilhadas com a fauna do Cretáceo do Domínio Tetiano. O gênero *Aguileria* foi provavelmente originado no Brasil, alcançando regiões tetianas durante o Cenomaniano, quando as barreiras geográficas associadas a abertura do Oceano Atlântico Sul foram menos efetivas (ver também Dias-Brito, 2000), favorecendo o intercâmbio entre as faunas tetianas;

(x) A fauna de Bakevelliidae da Formação Romualdo da Bacia do Araripe, juntamente com outros macroinvertebrados (i.e., gastrópodes, equinodermos, bivalves) é fortemente biocorrelacionável com a da Formação Riachuelo, Bacia de Sergipe-Alagoas, reforçando cenário paleogeográfico onde águas marinhas vindas de sudeste inundaram toda a Bacia do Araripe (vide também Martill, 1993; Martill et al., 2007; Assine et al., 2016).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Gawad, G.I., 1986. Maastrichtian non-cephalopod mollusks (Scaphopoda, Gastropoda and Bivalvia) of the Middle Vistula Valley, Central Poland. *Acta Geologica Polonica* 36, 69–224.
- Aberhan, M., 1994. Guild-structure and evolution of Mesozoic benthic shelf communities. *Palaios* 9, 516-45.
- Aberhan, M., Muster, H., 1997. Palaeobiology of Early Jurassic bakevelliid bivalves from Western Canada. *Palaeontology* 40, 799–815.
- Arai, M., 2016. Reply to the comments of Assine et al. (Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective”). *Brazilian Journal of Geology* 46, 9–13. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150046B>
- Arai, M., Coimbra, J.C., 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: *Atas do I Simpósio sobre a da Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato-CE*, pp. 225–239.
- Arai, M., Botelho-Neto, J., Lana, C.C. Pedrão, E., 2000. Cretaceous dinoflagellate provincialism in Brazilian marginal basins. *Cretaceous Research* 21, 351-366.
- Assine, M.L., 1990. Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 124 pp.
- Assine, M.L., 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 371–389.
- Assine, M.L., Perinotto, J.A. de J., Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., Mescolotti, P.C., 2014. Depositional sequences of the Alagoas Stage, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Boletim de Geociências da Petrobras* 22, 3–28.
- Assine, M.L., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., 2016. Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: A paleontological perspective.” *Brazilian Journal of Geology* 46, 3–7. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150046A>
- Beurlen, K., 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. In: *XVII Congresso Nacional de Geologia, Recife-PE*, pp. 1-47.
- Beurlen, K., 1964. As espécies dos Cassiopinae, nova subfamília dos Turritellidae, no Cretáceo do Brasil. *Arquivos de Geologia* 5, 1-44.
- Beurlen, K., 1966. Novos equinoides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 389, 455-464.
- Beurlen, K., 1971. A paleontologia na geologia do Cretáceo no Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 43, 89-101.
- Bieler, R., Carter, J.G., Coan, E. V., 2010. Classification of bivalve families. *Malacologia* 52, 113–133.
- Braun, O.P.G., 1966. Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da Região Nordeste do Brasil (Bacias de Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe). *Boletim DNPM/DGM* 236, 1-75.
- Brett, C., Baird, G.C., 1986. Comparative taphonomy: a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaios* 1, 207–227.
- Brito, I.M., 1984. The upper Lower Cretaceous in Brazil, its divisions and boundaries. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 56, 287- 293.
- Brito-Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, S., 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: *Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A.,*

- Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31 International Geological Congress, 151–182.
- Broin, F., 1994. Turtles from Chapada do Araripe, Early Cretaceous, Ceará State, Brazil. In: 3º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil. Rio Claro, São Paulo-SP, pp. 137-138.
- Brown, J.S., 1943. Suggested use of the word microfácies. *Economic Geology* 38: 325. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.38.4.325>
- Bruno, A.P.S., 2009. Paleontologia da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil: histórico, evidências marinhas e uma nova espécie de bivalvío (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 83 pp.
- Bruno, A.P.S., Hessel, M.H., 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo Marinho na Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos* 16, 39–49.
- Bruno A.P., Sial A.N., 2009. Ambiente de vida de Pseudoptera (Bivalvia, Bakelliidae) da Formação Romualdo, Bacia do Araripe. *Boletim da Sociedade Brasileira de Paleontologia* 24, 13.
- Carvalho, M.S.S., Santos, M.E.C.M., 2005. Histórico das Pesquisas Paleontológicas na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 28, 15-34.
- Coimbra, J.C., Arai, M., Carreño, A.L., 2002. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe basin, northeastern Brazil. *Geobios* 35, 687–698. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(02\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00082-7)
- Cox, L.R., 1969. Family Bakevelliidae, In: Moore, R.C., Teichert, C. (Eds.), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part N, Mollusca 6, Bivalvia 1*. Geological Society of America/University of Kansas Press, Boulder/Lawrence, N306–N310.
- Custódio, M.A., 2017. Arquitetura estratigráfica da Formação Romualdo, pós-rifte da Bacia do Araripe (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 103 pp.
- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T., Perinotto, J.A.J., Assine, M.L., 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology* 359, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.07.010>
- Damborenea, S.E., 1987. Early Jurassic Bivalvia of Argentina. Part 2: Superfamilies Pteriacea, Buchiacea and part of Pectinacea. *Palaeontographica A* 199, 113–216, 14 pls.
- Defrance, M.J.L., 1820. Gervillie, Gervillia, *Dictionaire des Sciences Naturelles* 18, 502-503.
- Dias-Brito, D., 2000. Global stratigraphy, palaeobiogeography and palaeoecology of Albian-Maastrichtian pithonellid calcispheres: Impact on Tethys configuration. *Cretaceous Research* 21, 315–349. <https://doi.org/10.1006/cres.2000.0196>
- Dunham, R.J., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures, In: Ham, W.E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*. AAPG, pp. 108-121.
- Embry, A.F., Klovan, J.E., 1971. A Late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island, NWT. *Canadian Petroleum Geology Bulletin* 19, 730-781.
- Fara, E., Saraiva, A.Á.F., Campos, D.D.A., Moreira, J.K.R., Siebra, D.D.C., Kellner, A.W.A., 2005. Controlled excavations in the Romualdo Member of the Santana Formation (Early Cretaceous, Araripe Basin, northeastern Brazil): Stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 218, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.12.012>
- Flügel, E., 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*, 2nd ed. Springer, Heidelberg.
- Freitas, B.T., Almeida, R.P., Carrera, S.C., Figueiredo, F.T., Turra, B.B., Varejão, F.G., Assine, M.L., 2017. Aptian sedimentation in the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift System and its

- tectonic and paleogeographic significance. *Journal of South America Earth Science* 80, 460–481. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.10.001>
- Fürsich, F.T., 1980. Preserved life positions of some Jurassic bivalves. *Paläontologische Zeitschrift* 54, 289-300.
- Fürsich, F.T., Oschmann, W., 1986 Storm shell beds of *Nanogyra virgula* in the Upper Jurassic of France. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 172, 141–161.
- Fürsich, F. T., Oschmann, W., 1993. Shell beds as tool in basin analysis – the Jurassic of Kachchh, western India. *Journal of the Geological Society* 150, 169-185.
- Fürsich, F.T., Custódio, M.A., Matos, S.A., Hethke, M., Quaglio, F., Warren, L.V., Assine, M.L., Simões, M.G., 2019. Analysis of a Cretaceous (late Aptian) high-stress ecosystem: The Romualdo Formation of the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Cretaceous Research* 95, 268–296. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.11.021>
- Guimarães, D., 1964. *Geologia do Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro., 674 pp.
- Hartt, C.F., 1870. *Geology and physical geography of Brazil*, In: Agassiz, L. (Ed.), *Scientific Results of a Journey in Brazil*. Boston: Fields, Osgood & Co. London: Trübner & Co., 8 & 60, Paternoster Row, pp. 1-620.
- Heimhofer, U., Hochuli, P.A., 2010. Early Cretaceous angiosperm pollen from a low-latitude succession (Araripe Basin, NE Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology* 161, 105-126.
- Heinberg, C., 1999. Lower Danian bivalves, Stevns Klint, Denmark: Continuity across the K/T boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 154, 87–106. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00088-7)
- Hessel, M.H., Filizola Jr., N.P., 1989. Algumas espécies de *Aguileria* (Bivalvia) do Albiano Inferior de Sergipe. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Paleontologia*., Curitiba (PR), pp. 301–315.
- Hessel, M.H., 2004. *Gervillia* (*Gervillia*) *solenioidea* DeFrance, 1820 (Bivalvia, Bakevelliidae) do Neo-Aptiano de Sergipe, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 7, 67–76. <https://doi.org/10.4072/rbp.2004.1.05>
- Hirayama, R., 1998. Oldest known sea turtle. *Nature* 392, 705-708.
- Holz, M., Simões, M.G., 2002. *Elementos Fundamentais de Tafonomia*. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 231p.
- ICZN., 1999. *International Code of Zoological Nomenclature*. Fourth edition. London, U.K. [available online at <http://www.iczn.org/iczn/index.jsp>]: International Trust for Zoological Nomenclature.
- Kegel, W., 1957. Novo Membro Fossilífero da Formação Itamaracá (Cretáceo Superior) de Pernambuco. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 29, 373–375.
- Kellner, A.W.A. 2002. Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE. Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro. In: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz, E.T., Winge, M., Berbert-Born, M., (Eds.) *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM/SIGEP pp. 121-130.
- Kellner, A.W.A., Campos, D.A., 2000. Brief Review of Dinosaur Studies and Perspectives in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 72, 509-538.
- Kidwell, S.M., 1991. The stratigraphy of shell concentrations. In: P.A., Allison, D.E.G., Briggs (Eds.), *Taphonomy, Releasing the Data Locked in the Fossil Record*, Plenum Press, New York, pp. 211-290.
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T., Aigner, T., 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios* 1, 228-238.

- Kidwell, S.M., Bosence, D.W.J., 1991. Taphonomy and time averaging of marine shelly faunas. In: P.A., Allison, D.E.G., Briggs (Eds.), *Taphonomy, Releasing the Data Locked in the Fossil Record*, Plenum Press, New York, pp. 115–209.
- Kidwell, S.M., Holland, S.M., 1991. Field description of coarse bioclastic fabrics. *Palaios* 6, 426-434.
- King, W., 1848. *A Catalogue of the Organic Remains of the Permian rocks of Northumberland and Durham*. Newcastle-upon-Tyne, 16 pp.
- Lazo, D.G., 2003. Taxonomy, facies relationships and palaeobiology of bakevelliid bivalves from the Lower Cretaceous of west-central Argentina. *Cretaceous Research* 24, 765–788. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2003.09.001>
- Lima, M.R., 1978. *Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil)* (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 335 pp.
- Mabesoone, J.M., Tinoco, I.M., 1973. Paleogeology of Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 14, 87–118.
- Maisey, J.G., 1991. *Santana Fossils – An Illustrated Atlas*. THF Publications, Neptune, New York, p. 459.
- Marques, F.O., Moulin, M., 2011. Arm wrestling between two mountains: Andes and Mid-Atlantic Ridge. *Geophysical Research Abstracts* 13, EGU2011-2406-1, EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Martill, D.M., 1993. Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil, *Palaeontological Association (Field Guides to Fossils: Number 5)*, p. 159.
- Martill, D.M., 2007. The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of north-east Brazil: a historical review and an appraisal of the biostratigraphic utility of its palaeobiota. *Cretaceous Research* 28, 895–920. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2007.01.002>
- Martill, D.M., Bechly, G., Loveridge, R.F. (Eds.), 2007. *The Crato Fossil beds of Brazil - Window into an Ancient World*. Cambridge University Press, New York, p. 625.
- Mathéron, P., 1842. *Catalogue méthodique et descriptif des Corps organisés fossiles du département des Bouches-du-Rhône et lieux circonvoisins; précédé d'un Mémoire sur les terrains supérieurs au grès bigarré de S. E. de la France. – Répertoire des travaux de la Société de statistique de Marseilles* 6, 81-341, Taf. 1-41.
- Maury, C.J., 1936. O Cretáceo de Sergipe. *Monografia do Serviço Geológico e Mineração do Brasil* 11, 1-283.
- McKittrick M.A., 1987. Experiments on the settling of gastropod and bivalve shells: biostratigraphic implications. In: Flessa K.W., (Ed.), *Paleoecology and taphonomy of Recent to Pleistocene intertidal deposits Gulf of California*, The Paleontological Society Special 2, pp. 150-163.
- Mello, L.H.C., Mello, F.T., Zucon, M.H., 2007. A new species of *Gervillia* Defrance (Bivalvia, Bakevelliidae) from the Aptian-Albian transition of Sergipe, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 10, 63–69.
- Morales, N., Assine, M.L., 2015. Chapada do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: Vieira, B.C.; Salgado, A.A.R; Santos, L.J.C. (Orgs.). *World Geomorphological Landscapes*. Dordrecht: Springer, Netherlands, p. 231-242.
- Moura, M.V., 2007. *Análise Estratigráfica do Andar Alagoas na borda leste da Bacia do Araripe* (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, 74 pp.
- Muster, H., 1995. Taxonomie und paläobiogeographie der Bakevelliidae. *Beringeria* 14, 3–161.

- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., Almeida, J.A.C., 2015. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano- Albiano, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Ciências Naturais do Museu Paraense Emílio Goeldi* 533, 231–246.
- Pereira, P.A., Cassia, R., Cassab, T., Magnólia, A., Barreto, F., 2017. Paleocologia e Paleogeografia dos Moluscos e Equinoides da Formação Romualdo, Aptiano – Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 40, 180–198.
- Pereira, P.A., Cassia, R., Cassab, T., Magnólia, A., Barreto, F., 2018. As Famílias Veneridae, Trochidae, Akeridae e Acteonidae (Mollusca), na Formação Romualdo: Aspectos Paleocológicos e Paleobiogeográficos no Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe, NE do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 41, 137–152.
- Regali, M.S.P., 2001. Palinoestratigrafia dos sedimentos cretácicos das bacias do Araripe e das bacias interiores do Nordeste - Brasil. In: Barros, L.M., Nuvens, P.C., Filgueira, J.B.M., I e II Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato-CE, p. 101-108.
- Rios-Netto, A.M., Regali, M.S.P., 2007. Estudo bioestratigráfico, paleoclimático e paleoambiental do intervalo Alagoas (Cretáceo Inferior) da bacia do Araripe, nordeste do Brasil (Poço 1-PS-11-CE). In: Carvalho, I.S., (Org.), *Paleontologia: Cenários de Vida*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, v. 2, p. 479-488.
- Sales, A.M.F., 2005. Análise tafonômica das ocorrências fossilíferas de macroinvertebrados do Membro Romualdo (Albiano) da Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil: significado estratigráfico e paleoambiental (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 173 pp.
- Santos, M.E.C.M., 1982. Ambiente deposicional da Formação Santana - Chapada do Araripe (PE/PI/CE). In: *Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador (BA)*, Anais, v.4, p. 1413-1426.
- Stanley, S.M., 1970. Relation of shell form to life habits of the Bivalvia (Mollusca). *Geological Society of America, Memoir* 125, 1–296.
- Stanley, S.M., 1972. Funcional morphology and evolution of byssally attached molluscs. *Journal of Paleontology* 46, 165–212.
- Seilacher, A., 1984. Constructional morphology of bivalves: evolutionary pathways in primary versus secondary soft-bottom dwellers. *Palaeontology* 27, 207–237.
- Seilacher, A., Reif, W.E., Westphal, F., 1985. Sedimentological, ecological and temporal patterns of fossil Lagerstätten. *Royal Society of London Philosophical Transactions* 311, 5–23.
- Silva, V.R., Varejão, F.G., Matos, S.A., Fürsich, F.T., Skawina, A., Scheneider, S., Warren, L.V., Assine, M.L., Simões, M.G. *Cratonaia novaolindensis* gen. et sp. nov. (Unionida, Silesunionoidea) from the Aptian of Brazil (Araripe Basin), and its implications for the early evolution of freshwater mussels. *Cretaceous Research* 107, 1-15.
- Silva-Santos, R., Valença, J., 1968. A Formação Santana e sua Paleoiçtiofauna. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 40, 339-360.
- Simões, M.G., Ghilardi, R.P., 2000. Protocolo tafonômico/paleoautoecológico como ferramenta na análise paleossinecológica. *Pesquisas em Geociências* 27, 3-13.
- Simões, M.G., Kowalewski, M., 1998. Shell beds as paleoecological puzzles: a case study from the Upper Permian on the Paraná Basin, Brazil. *Facies* 38, 175-196.
- Simões, M.G., Torello, F.F., 2003. Modelo de tafofácies para os moluscos bivalves do Grupo Passa Dois (Formações Serra Alta, Teresina e Corumbataí), Permiano Superior, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 33, 1-10.
- Simões, M.G., Rodrigues, S.C., Leme, J.M., Bissaro Jr., M.C., 2005. The settling pattern of brachiopod shells: Stratigraphic and taphonomic implications to shell bed formation and paleoecology 35, 383-391.

- Stephenson, L.W., 1952. Larger invertebrate fossils of the Woodbine Formation (Cenomanian) of Texas. United States Geological Survey Professional Paper 242, 1–226.
- Tëmkin, I., 2006. Morphological perspective on the classification and evolution of Recent Pterioidea (Mollusca: Bivalvia). *Zoological Journal of the Linnean Society* 148, 253–312. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2006.00257.x>
- Tomé, M.E.T.R., Lima-Filho, M., Neumann, V., 2014. Taxonomic studies of non-marine ostracods in the Lower Cretaceous (Aptian–lower Albian) of post-rift sequence from Jatobá and Araripe basins (Northeast Brazil): Stratigraphic implications. *Cretaceous Research* 48, 153–176.
- Tucker, M.E., Dias-Brito, D., 2017. Petrologia sedimentar carbonática: iniciação com base no registro geológico do Brasil. Rio Claro: UNESP – IGCE-UNESPetro, *Obra* 3. p. 208.
- Valença, L.M.M., Neumann, V.H., Mabesoone, J.M., 2003. An overview on Callovian Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: Onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geologica Acta* 1, 261–275.
- Varejão, F.G., 2019. Abordagem multi-indicadores do sistema misto carbonático-siliciclástico da Formação Crato: Evolução sedimentar, paleogeografia e tectônica. (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências e Meio Ambiente, Unesp, Rio Claro, 203 pp.
- Varejão, F.G., Warren, L.V., Perinotto, J.A. de J., Neumann, V.H., Freitas, B.T., Almeida, R.P. de, Assine, M.L., 2016. Upper Aptian mixed carbonate-siliciclastic sequences from Tucano Basin, Northeastern Brazil: Implications for paleogeographic reconstructions following Gondwana break-up. *Cretaceous Research* 67, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.06.014>
- Varejão, F.G., Fürsich, F.T., Warren, L.V., Matos, S.A., Rodrigues, M.G., Assine, M.L., Sales, A.M.F., Simões, M.G., 2019. Microbialite fields developed in a protected rocky coastline: The shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil). *Sedimentary Geology* 389, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.06.003>
- Viana, M.S.S., Agostinho, S.M., 1995. Camarões do Membro Romualdo da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe). *Boletim Núcleo Nordeste Sociedade Brasileira Geologia* 14, 239–243.
- White C.A., 1887a. Contribuições à Paleontologia do Brasil. *Archivos do Museu Nacional do Rio Janeiro* 7, 1–123.
- White, C.A., 1887b. On New Generic Forms of Cretaceous mollusca and their relation to other forms, In: *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*. pp. 32–37.
- Zucon, M.H. 2005. Amonóides da transição Aptiano-Albiano da bacia de Sergipe, Brasil (Dissertação de Mestrado). Instituto de Geociências, UFBA, Salvador-BA, 165 pp.

APÊNDICE

Short-lived “Bakevelliid-Sea” in the Aptian Romualdo Formation, Araripe Basin, Northeastern Brazil

SHORT-LIVED “BAKEVELLIID-SEA” IN THE APTIAN ROMUALDO FORMATION, ARARIPE BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL

M.G. Rodrigues¹, S.A. Matos², F.G. Varejão³, F.T. Fürsich⁴, L.V. Warren¹, M.L. Assine¹,
M.G. Simões²

¹*Departamento de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Avenida 24A, 1515, Rio Claro 12506-900, Brazil*

²*Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Distrito de Rubião Júnior, Botucatu 18618-000, Brazil*

³*Instituto LAMIR, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Rua Francisco H. dos Santos, 10, Jardim das Américas, Centro Politécnico, Curitiba 81531-980, Brazil*

⁴*GeoZentrum Nordbayern, FG Paläoumwelt, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstr 28, 91054 Erlangen, Germany*

HIGHLIGHTS:

- New Aptian bakevelliid species described for the Araripe Basin;
- Bakevelliids abundant enough to generate shell-rich carbonates;
- Faunal affinities with bakevelliids from the Riachuelo Formation, Sergipe-Alagoas Basin;
- Short-lived marine episode connecting the Araripe and Brazilian marine marginal basins through Recôncavo-Tucano basins.

ABSTRACT

New Aptian (Lower Cretaceous) bakevelliid bivalves are described for the Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin, northeastern Brazil. Together with the other known members of the family Bakevelliidae, already recorded from the unit (i.e., *Aguileria dissita*), the new bivalves (*Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov., and Gen. et sp. indet.) indicate that the Romualdo bakevelliid fauna was more diverse than previously realized. Bakevelliid-rich carbonates, some with specimens preserved *in situ*, are restricted to the upper third of this unit, a stratigraphic interval yielding also echinoderm-, gastropod- and stromatolite-bearing limestones. These pteriomorphian bivalves were widely distributed in the Romualdo Formation and are a testimony of the short-lived Bakevelliid-Sea

that flooded the whole Araripe Basin during the Aptian. Notably, *Aguileria romualdoensis* sp. nov. closely resembles *A. renauxiana* from the Cenomanian Woodbine Formation, Texas, US. In addition, *Aguileria dissita* is also recorded in the Upper Aptian-Albian Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin. Together with other macroinvertebrates (i.e., gastropods, echinoderms, bivalves) the bakevelliid fauna of the Romualdo Formation can be tightly correlated with that of the Riachuelo Formation, supporting a paleogeographic scenario with a marine ingression flooding the Araripe Basin from the southeast, probably via the seaway developed in the Recôncavo-Tucano basin area. Finally, sedimentologic, stratigraphic and paleontological data indicates that the fate of the bakevelliids in the Romualdo Formation was linked to the onset of continentalization of the Araripe Basin.

Key words: Pteriomorphian bivalves, Shell beds, Lower Cretaceous seaway, Santana Group, Gondwana breakup.

INTRODUCTION

Bakevelliids are extinct, marine, stationary epifaunal/semi-infaunal suspension feeding bivalves with at least 20 described genera and numerous occurrences worldwide (The Paleobiology Database, accessed in February 2020). They thrived from the Late Paleozoic to Eocene (Lazo, 2003, and references therein), reaching their maximum diversity during Early and Middle Jurassic times (Lazo, 2003). They were also abundant and widespread in many Cretaceous sedimentary successions, especially in the United States (see The Paleobiology Database - <https://paleobiodb.org/>). Cretaceous bakevelliids are also known from South America, mainly Argentina (Lazo, 2003), Brazil (White, 1887a; Maury, 1936; Hessel and Filizola Jr., 1989; Hessel, 2004; Mello et al., 2007; Bruno, 2009; Pereira et al., 2015), Chile (Hallam et al., 1986), and Venezuela (von der Osten, 1957). Though, the best studied occurrences are those in Argentina (see Lazo, 2003).

In the Brazilian territory, bakevelliids were recorded in Lower Cretaceous rocks of the Pernambuco-Paraíba, Sergipe-Alagoas, and Araripe basins, all located in northeastern Brazil (White, 1887a; Maury, 1936; Kegel, 1957; Guimarães, 1964; Hessel and Filizola Jr., 1989; Hessel, 2004; Mello et al., 2007; Bruno, 2009; Pereira et al., 2015). Still, in spite of the contribution of Pereira et al. (2015), Cretaceous bakevelliids from the Araripe Basin are only poorly known. This is also true of other bivalve groups found in this basin, especially from the Romualdo Formation, upper part of the Santana Group, from which the first bivalve mollusks

were recorded by Hartt (1870). Since then, several papers, monographs (i.e., dissertations, theses), and numerous short communications were published, dealing with the occurrence of bivalves in rocks of the Romualdo Formation. However, most of these publications lack illustrations, formal taxonomy descriptions and/or information about the repositories. In this context, the contributions of Bruno (2009), Pereira et al. (2015, 2017, 2018), Prado et al. (2018) and Fürsich et al. (2019) are exceptions. Consequently, our knowledge on the taxonomy of Cretaceous bivalves from the Araripe Basin is still meager, which weakens proposed biocorrelations and envisaged paleogeographic reconstructions.

In the past five years, in the scope of a high-resolution (bed-by-bed) stratigraphic investigation of the Romualdo Formation, the vertical distribution of bivalves and of other benthic macroinvertebrates was constrained by recording and sampling at high resolution geological sections along the outcrop belt of this unit at the eastern border of the Araripe Basin (see Custódio et al. 2017 and Fürsich et al., 2019). Of special interest are the occurrences of bivalves of the family Bakevelliidae King, 1850, since these pteriomorphian bivalves are also recorded in early Cretaceous successions preserved in basins of the Brazilian continental margin. In fact, to date, the biostratigraphic and paleoenvironmental utility of bakevelliid bivalves has been overlooked in preference to other benthic macroinvertebrates such as echinoids (Beurlen, 1963; 1966; Pereira et al., 2017) and microfossils (ostracods: Mabesoone and Tinoco, 1973; and dinoflagellates: *Subtilisphaera* ecozone, Arai and Coimbra, 1990; Coimbra et al., 2002). In this context, given the fact that bakevelliids are not strictly facies-dependent, having low degrees of endemism (Muster, 1995; Aberhan and Muster, 1997), they are relevant in paleobiogeographic investigations (Lazo, 2003). Therefore, these pteriomorphian bivalves in the Araripe Basin yield additional paleontological information, in the current paleogeographic discussion, on the most likely pathway for the marine ingression that reached the Araripe Basin during late Aptian time (see Martill, 1993; Arai, 2014, 2016, Assine et al., 2016). Obviously, robust taxonomic and stratigraphic information is of prime importance for this approach. Based on this, we describe and discuss herein, in detail and for the first time, the taxonomy, stratigraphic and geographic distribution of bakevelliids within the Romualdo Formation of the Araripe Basin. These data allowed us to better constrain the vertical distribution of the bakevelliid-bearing rocks of the Romualdo Formation and to biocorrelate them with other coeval sedimentary basins of the Atlantic continental margin, in the context of the Aptian marine ingressions that flooded the northeastern Brazilian territory during the early Cretaceous.

BACKGROUND: BRAZILIAN CRETACEOUS BAKEVELLIID BIVALVES

Detailed review of the paleontological record of the Mesozoic benthic invertebrates in Brazil indicates that bakevelliid bivalves are recorded in various Cretaceous successions preserved in the Sergipe-Alagoas, Araripe and Pernambuco-Paraíba basins (Fig. 1). In the Sergipe-Alagoas Basin, bakevelliids are recorded in the Riachuelo Formation, Riachuelo town, Sergipe State. The first bakevelliid from this unit was originally described by White (1887a), as *Gervillia dissita*, from the Porto dos Barcos fossil locality. In the same year, White (1887b) described a new genus, named *Aguileria*, based on specimens from the Cenomanian of Texas, USA. This author noted that both, *Gervillia renauxiana* Mathéron, 1852, recorded from the Cretaceous of France, and *Gervillia dissita* from Brazil, were probably referable to the new North American genus. Later, Maury (1936) kept the species *dissita* as a valid taxon within the genus *Gervilleia* DeFrance, 1820 (*sensu* Maury, 1936), and also described a new species, named *Gervilleia regoi*.

Half a century after Maury's seminal study, the species *Gervilleia dissita* and *G. regoi* were redescribed by Hessel and Filizola Jr. (1989), referring them to *Aguileria* White, 1887b, mainly based on the general shell morphology, auricle shape, and the number and position of pits in the ligament area. Following this, Hessel (2004) and Mello et al. (2007) provided meaningful papers on the morphology and ecology of the bakevelliids from the Sergipe-Alagoas Basin. Based on specimens collected from distinct localities in the Sergipe State (see Table 1 for UTM coordinates) Hessel (2004) concluded that the bakevelliids belong to *Gervillia (Gervillia) solenoidea* DeFrance, 1820, a common species from the European Cretaceous (e.g., Abdel-Gawad, 1986; Heinberg, 1999). According to Hessel (2004), the general valve morphology of *G. (G.) solenoidea* supports a pendant epifaunal mode of life. Mello et al. (2007), in turn, described a new species, *Gervillia (Gervillia) sergipensis*, based on 78 specimens preserved in limestones of the basal part of the Riachuelo Formation from two distinct localities (Table 1). Studying specimens from the same localities of Hessel (2004), Mello et al. (2007) concluded that *G. (G.) solenoidea* probably belongs to *G. (G.) sergipensis*. According to Mello et al. (2007), *G. (G.) sergipensis* most likely lived semi-infaunally, which differs from the mode of life inferred by Hessel (2004).

In the Araripe Basin, bivalves of the family Bakevelliidae are known only from the sedimentary succession of the Romualdo Formation (Beurlen, 1963). The specimens are restricted to fossil localities in the Ceará, Piauí and Pernambuco states. The first Bakevelliidae described (referred to *Aguileria* sp.), were found in limestones from the Romualdo Formation

in the western border of the basin, south of the town of Araripina, near the localities of Lagoa de Dentro and Rancharia (Beurlen, 1963, 1971a). Specimens from this site were also mentioned by Mabesoone and Tinoco (1973) and Sales (2005), but illustrations of them were not provided. Bruno (2009), in her doctoral thesis, presented some taxonomic and paleoecologic observations on new bakevelliid bivalves found in a shell-rich limestone from the town of Jardim, Ceará State (Table 1). In this work, the author erected a new bakevelliid specie, *Pseudoptera beurleni*, based on specimens with a thin, smooth, inequivalve and mytilifom shell, and with a prolonged cardinal line and protruding umbo (Bruno, 2009). Unfortunately, this study was never published, so *Pseudoptera beurleni* is considered a *nomen nudum* according to the rules of the ICZN (1999).

More recently, Pereira et al. (2015) described *Aguileria dissita* in calcarenites from the western side of the Araripe Basin (Table 1), Pernambuco State, confirming the occurrence of this species outside the Sergipe-Alagoas Basin. According to Pereira et al. (2015), *Aguileria dissita* may have been a semi-infaunal bakevelliid, living attached to soft substrates by byssus threads in high-energy settings (Pereira et al., 2015).

Bakevellia King, 1848 is another bakevelliid bivalve recorded in the upper part of the Romualdo Formation (Fürsich et al., 2019, pp. 277, fig. 7N) from Jardim town (Table 1), Ceará State. Fürsich et al. (2019) considered *Bakevellia* sp. as an epibyssate form. It is important to note that the specimens referred to *Bakevellia* sp. by Fürsich et al. (2019) belongs to one of the new taxa described here (see below).

Finally, the presence of bakevelliid in the Pernambuco-Paraíba Basin were reported by Kegel (1957) and Guimarães (1964), which mentioned the occurrence of *Gervillia* sp. in gray sandstones from the Beberibe Member, Itamaracá Formation (Fig. 1).

GEOLOGICAL CONTEXT

The Araripe Basin were developed over Precambrian terrains of the Transversal Zone from the Borborema Structural Province, between the Patos and Pernambuco lineaments (Fig. 2). The basin has the thickest sedimentary record and the most complex tectono-stratigraphic history among all the interior basins of NE Brazil (Assine 1992; Assine, 2007), and its rift phase is constrained by strike-slip tectonics (Rosa et al., 2019) related to the late Jurassic-early Cretaceous Gondwana break-up (Matos, 1992; Valença et al., 2003; Assine, 2007).

Recent studies suggest that during the Aptian post-rift phase (Assine et al., 2016; Custódio et al., 2017, and Fürsich et al., 2019), the Araripe Basin were affected by brief marine episodes

(i.e., incursions). The causes, direction and effects of these incursions has been subject of intense debate in recent years (Arai, 2016; Assine et al., 2016; Varejão et al., 2016, and Freitas et al., 2017, for a recent review), but there is a consensus that these transgressive events flooded huge inland areas in the interior of northeast Brazil.

The Cretaceous sedimentary succession of the Araripe Basin is represented by rocks from the Santana Group, encompassing from base to top, the Barbalha, Crato, Ipubi, and Romualdo formations (Assine et al., 2014; Neumann and Assine, 2015). The studied bivalves were recorded in the Romualdo Formation, that is thicker at the eastern part of the Araripe Basin, where it reaches up to 100 m (Custódio et al., 2017). This unit is composed of sandstone, shale and subordinated limestone deposited in coastal and shallow marine mixed siliciclastic-carbonate systems (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019; Varejão et al., 2019).

The Romualdo Formation comprises two transgressive-regressive (TR) cycles (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). The first TR cycle includes black shale with fossil-rich carbonate concretions, also including exceptionally preserved fish specimens, some with fossilized soft tissues (= Santana *Konservat-Lagerstätte*; Maisey, 1991; Fara et al., 2005; Martill et al., 2007). In terms of taxonomic composition, abundance and preservation, the benthic macrofauna recorded in the first TR cycle slightly differs from that found in rocks of the second TR cycle (Fürsich et al. (2019). In fact, in the second TR cycle the shell-rich fossil concentrations are recorded in an up to 5-m-thick mixed carbonate-siliciclastic succession deposited under high-energy (storm) to fair-weather-wave conditions (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). This interval records one of the main marine incursions in the stratigraphic archives of the Araripe Basin, when bivalve and echinoid fossils thrived throughout the basin (Beurlen, 1966; Martill, 2007, p. 912).

At the western side of the Araripe Basin, the thickness of the Romualdo Formation is reduced, and mainly composed of incomplete successions of fossil-rich, concretion-bearing shales and shell-rich limestones (Custódio et al., 2017). Gastropods (i.e., cassiopids, cerithiids, and naticids) and bivalves (i.e., bivalves, mytilids, corbulids and venerids) are the commonest molluscs in the benthic fossil assemblage (Pereira et al., 2015, 2016, 2017, 2018). These fossils are usually preserved in cm-thick, densely packed shell-beds, also including echinoid remains (Beurlen, 1966; Sales, 2005; Prado et al., 2015; Pereira et al., 2017; Varejão et al., 2019). Some carbonate-bearing rocks of the Romualdo Formation, containing amalgamated bivalve rudstones, echinoid-bearing microbialites, bioherms, biostromes and

isolated stromatolites resting directly on the crystalline basement, suggesting a rocky shoreline on the margin of a low-gradient carbonate ramp deepening to the east (Varejão et al., 2019).

MATERIAL AND METHODS

In this study, a total of 361 bakevelliid specimens from the Romualdo Formation were examined. The specimens were collected along several outcrops in the Araripe Basin, especially those from the upper part of the Romualdo Formation. The main investigated successions are located at Sobradinho area, in the vicinities of the town of Jardim, and Serra do Inácio locality, near town of Araripina (see Fig. 2). Both columnar sections were recently described by various authors (e.g., Custódio, 2017; Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019; Varejão et al., 2019) and will not be detailed here. However, other columnar sections measured in the northern and western borders of the Araripe Basin, were represented in detail in Figure 3.

The specimens are mainly represented by internal molds (up to 300 individuals), followed by external molds and few recrystallized shells. Disarticulated (n= 316), left valves predominate (n= 280), with reduced number of articulated valves (n= 45). The quality of preservation is usually good with many specimens preserving parts of the internal shells characters (i.e., muscle scars, pallial line). The shell deformation due to compaction is negligible. As already noted by Fürsich et al. (2019), some bakevelliid are preserved as *in situ* specimens in rudstones from the Sobradinho section. In general, these specimens are associated with gastropods (e.g., epitonids) and bivalves (e.g., *Sinonia* sp. and *Calva* sp.) (Fürsich et al., 2019). At the Serra do Inácio section, bakevelliids are associated with small mytiliform bivalves, such as *Musculus* sp.

During the laboratory preparation, the studied fossils were dry cleaned (carefully brushed) and, when necessary, precision dental instruments were used in order to remove or better expose the fossils from the rock matrix. After that some specimens were coated with magnesium oxide to enhance contrast and emphasize internal and external anatomical characters (i.e., ligament area, hinge, muscle scars, and ornamentation). When appropriate, latex and plasticine (FIMO brand) casts were prepared being occasionally coated with magnesium oxide. A Nikon Digital Camera (D3200), equipped with a macro-lens (105 mm) was used for digital imaging of the specimens. For each one, a series of images showing different focal planes were produced and posteriorly merged using the focus stacking procedure in the Adobe Photoshop CC. Subsequently, schematic drawings of the imaged specimens were prepared using the Corel Draw[®] software.

Descriptive terms and interpretations of internal and external characters of the specimens are based on Cox (1969), Muster (1995), and Tëmkin (2006). Figure 4 summarizes the main morphological terminology used and the measured shell characters. Bivalve classification for taxonomic categories above the genus level followed Bieler et al. (2010). Finally, the term “Bakevelliid-Sea” is informally used here to define the time interval where these bivalves were widely distributed in the whole Araripe Basin and were the dominant bioclasts in the cm-thick floatstones and rudstones of the upper part of the Romualdo Formation (Rodrigues, 2020).

Shell morphology abbreviations.— The following abbreviations are used in this study: aa, anterior auricle; at, anterior teeth; ams, accessory (pedo-byssal) muscle scar; bg, byssal gape; farms, fused anterior (pedo-byssal) retractor muscle scar; gl, growth lines; lga, ligamental area; lp, ligamental pit; lv, left valve; pal, pallial line; pams; posterior adductor muscle scar; prms, posterior pedo-byssal retractor muscle scar; ps, posterior socket; pt, posterior teeth; pw, posterior wing; rr, radial ribs; rv, right valve.

Measurements abbreviations.— D, length of central body; L, length; Laur, anterior auricle length; Lwing, posterior wing length; H, height; Wlig, width of the ligament area; O, obliquity (i.e. angle between the dorsal margin and the diagonal in the central body); Pits, number of preserved ligament pits; W, width or inflation of articulated valves.

Repository and institutional abbreviations. — All examined specimens are housed in the paleontological collection of the Institute of Biosciences (IBB), São Paulo State University (UNESP), Botucatu Campus, São Paulo State, Brazil. The abbreviation used for the institutional acronym is DZP-.

RESULTS

Systematic Paleontology

Class Bivalvia Linnaeus, 1758

Subclass Autobranchia Grobben, 1894

Superorder Pteriomorpha Beurlen, 1944

Order Pteriida Newell, 1965
Superfamily Pterioidea Gray, 1847
Family Bakevelliidae King, 1850

Genus *Araripevella* gen. nov.

Type species: Araripevella musculosa gen. et sp. nov.

Etymology: The genus name combines the name of the sedimentary basin (Araripe) where the type species was found and Bakevella King, 1848, the type genus of the family Bakevelliidae King, 1850.

Diagnosis: Small trapeziform, slightly inequivalve, non-gaped shell; anterior auricle well-developed, triangular, posterior wing poorly demarcated. Ligament area narrow, with multiple (3-4) fan-shaped pits. Hinge with five to six small anterior teeth, perpendicular to hinge axis, one or two longitudinal posterior teeth present. Monomyarian shell, with a well-developed, elongated, posterior adductor muscle scar. Anterior pedo-byssal retractor muscle scar well-marked, large, fused to the posterior adductor muscle scar. Small, deeply impressed, anterior pedo-byssal retractor muscle scar and accessory pedo-byssal muscle scar at the umbonal cavity. Faint radial grooves on the internal shell surface.

Araripevella musculosa sp. nov.

Figs. 5-7

2009 *Pseudoptera beurleni* Bruno: pp. 49-57, pl. 1 (*nomen nudum*).

2019 *Bakevella* sp., in Fürsich et al., p. 277, figs. 7n, 8d.

Type material: Holotype, DZP-20464, a right valve. Paratypes, one right valve, DZP-20625I and five articulated valves, DZP-19988II, DZP-20521BII, DZP-20610I, DZP-20654 and DZP-20655.

Additional material: DZP-19973II, DZP-19978I, DZP-20002, DZP-20004, DZP-20006, DZP-20460I, DZP-20462, DZP-20463, DZP-20478I, DZP-20478II, DZP-20508, DZP-20520I, DZP-20557I, DZP-20566II, DZP-20571II, DZP-20576, DZP-20584II, DZP-20623AI, DZP-

20623AIII, DZP-20623AIV, DZP-20646, DZP-20647, DZP-20649, DZP-20659, DZP-20707, DZP-20716, DZP-20720.

Measurements: See Table 2 for shell measurements of *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov.

Type locality: Sobradinho section, Jardim town, Ceará State, northeastern Brazil.

Stratigraphic horizon: 0.7-m-thick succession of shell-rich limestone beds with undulated base and top in the upper part of the Romualdo Formation.

Occurrence. Jardim and Araripina towns, Ceará and Pernambuco states, northeastern Brazil, Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin, Aptian-Albian.

Etymology: Latin *musculosa*, given the well-developed monomyarian musculature characterized by a deeply impressed adductor muscle and retractor pedo-byssal muscle scars.

Diagnosis: As for the genus.

Description: Small, thin pteriod shell (maximum length: 23.7 mm), slightly inequivalve and strongly inequilateral. Shell trapezoidal, commissural plane straight posteriorly and slightly sinuous anteriorly. Dorsal margin straight; posterior margin slightly convex; ventral margin strongly curved; anterior margin nearly straight. Anterior auricle small but well-defined. Left valve (LV) more convex than right valve (RV), with prominent umbo. Beak of LV strongly prosogyrous; umbo curved towards dorsal margin. RV with low umbo and indistinct beak ending just at dorsal margin (Figs. 5-7). Auricular sulcus less prominent than in LV. Ligament external, opisthodontic, multivincular. Ligament area flat, ornamented with straight growth lines parallel to dorsal margin. Margins of ligament area meeting each other at an angle varying between 35.7° and 53.7°. With several (3-4) sub-rectangular ligament pits (Fig. 6D-J). Shell monomyarian with well-marked muscle scars and pallial line. Posterior adductor muscle scar large, narrow, dorso-ventrally elongated, incurved and deeply impressed, bordered anteriorly by posterior pedo-byssal retractor muscle scar. Muscle scars located close to posterior shell margin. Two small, well-defined scars visible in the umbonal cavity, close to dorsal margin,

and possibly corresponding to the fused anterior pedo-byssal retractor muscle scar and accessory pedo-byssal muscle scar. Small pitted accessory muscle scars visible just at the transition between dorsal and posterior margins (Figs. 5, 6A, C, 7A-B, D). Pallial line dotted, well-impressed. In anterior part of shell, pallial line close to shell margin, but placed far ventrally (Figs. 5A-B, E-H, 6G-H, 7A-B, E-G). Anterior auricle well-developed and triangular. Interior of LV with well-marked radial fold corresponding to interior surface of auricular sulcus. Posterior wing poorly defined, with rounded posterior projection. Hinge of LV with one well-defined elongated posterior tooth and two sockets. Hinge of RV with at least five to six small, well-differentiated anterior teeth, oriented perpendicular to hinge axis, and two well-defined, elongated, subparallel posterior teeth and one socket (Fig. 6A-H). Shell of both valves externally ornamented with irregular commarginal flanges and faint radial ribs, the latter better visible at the umbones (Fig. 7H). Given the preservational state of shells, it is difficult to determine, whether both width and density of radial ribs varies along distinct shell portions. Shell interior with faint radial grooves better observed close to shell margin (Fig. 7C-D).

Remarks: Despite of the typical pteriod shell shape of *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., it differs from other bakevelliids by the presence of a monomyarian musculature characterized by fused posterior adductor and pedo-byssal retractor muscle scars. Both muscle scars are well developed, elongated and deeply impressed (Figs. 5A-B, E-H, 6A, C, 7A-B, D). *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. also exhibits a curious set of morphological characters, as the general shell morphology and hinge resemble that of *Bakevella* King, 1848, but its musculature is similar to that of *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1852, in Muster, 1995, p. 20) from the Cretaceous (Cenomanian) of Texas (USA), as illustrated (but not described) by Stephenson (1952, pl. 16). The shells of *Araripevella musculosa* morphologically differ from other co-occurring bakevelliids of the Romualdo Formation, namely *Aguileria romualdoensis* sp. nov. and gen. et sp. indet. For example, the ligament area of *Aguileria romualdoensis* sp. nov. (Fig. 8A-B) is more triangular and higher than that of *Araripevella musculosa*. The ligament pits are also distinct being parabolic and elongated in *Aguileria romualdoensis* sp. nov. and subrectangular in *Araripevella musculosa* (Fig. 6D-J). Finally, the posterior wing of the shell of Ggn. et sp. indet. (Fig. 9) is more pronounced than that of *Araripevella musculosa*. Unfortunately, a more precise comparison between both species cannot be made since the muscle scars and hinge of gen. et sp. indet. are unknown.

Genus *Aguileria* White, 1887b

Type species: Aguileria cumminsi White, 1887b, Cenomanian of the Texas, USA.

Aguileria romualdoensis sp. nov.

Fig. 8

Type material: Holotype, DZP-20709, a right valve. Paratypes, three right valves, DZP-19989I, DZP-20523II and DZP-20699.

Additional Material: DZP-19989IX, DZP-20126III, DZP-20126VII, DZP-20536, DZP-20695A, and DZP-20702II.

Measurements: See Table 3 for shell measurements of *Aguileria romualdoensis* sp. nov.

Type locality: Sobradinho section, Jardim town, Ceará State, northeastern Brazil.

Stratigraphic horizon: 0.7-m-thick succession of shell-rich limestone beds with undulating base and top in the upper part of the Romualdo Formation.

Occurrence. Jardim and Araripina towns, Ceará and Pernambuco states, northeastern Brazil, Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin, Aptian-Albian.

Etymology: Latin *romualdoensis*, from the Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin.

Diagnosis: *Aguileria* with shallow and well-marked sulcus delimiting a robust anterior auricle that is densely ornamented with rugae. Shell with a faintly impressed, elongated, posterior adductor muscle scar. A weakly marked posterior pedo-byssal retractor muscle scar is fused with the posterior adductor muscle scar. Other internal shell characters unknown.

Description: Shell small (maximum length: 19.3 mm), thin, rhombic, and strongly inequilateral (Fig. 8E-H). Dorsal margin straight, posterior margin slightly convex, ventral margin strongly

convex. Posterior wing poorly developed; anterior auricle well demarcated, robust (Fig. 8). Beak low, strongly prosogyrous; umbo of right valve ending at upper margin of ligament area, which is flat, thick, triangular, and exhibiting at least two elongate and parabolic pits (Fig. 8). Hinge teeth unknown. Shell with a faintly impressed elongated posterior adductor muscle scar and a fused posterior pedo-byssal retractor muscle scar (Fig. 8C-D). Pallial line and other muscle scars unknown. Shell ornamentation visible at the auricles only and characterized by dense commarginal rugae (Fig. 8).

Remarks: *Aguileria romualdoensis* sp. nov. differs from all other bakevelliids by its general outline. Whereas the shells of *Aguileria romualdoensis* sp. nov. are rhombic, those of *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. and gen. et sp. indet. are trapezoidal in outline. *Aguileria romualdoensis* sp. nov. closely resembles *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1852, in Muster, 1995, p. 20) from the early Cretaceous Woodbine Formation, Texas (Stephenson, 1952) (Fig. 10). Both shells are rhombic with a well-developed triangular ligament area (Stephenson, 1952, pl. 16, figs. 5-8). As described above, *Aguileria romualdoensis* sp. nov. is monomyarian, characterized by an elongated, fused, posterior adductor muscle scar and a faintly marked posterior pedo-byssal retractor muscle scar (Fig. 8C-D). As shown in Fig. 10 (see also pl. 16, figs. 5-8 of Stephenson, 1952,), the monomyarian musculature of *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1842) closely resembles that of *Aguileria romualdoensis* sp. nov. In both species a well-developed, elongated and fused posterior adductor and pedo-byssal retractor muscles scars are present (Figs. 8C-D, 10). However, *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1842) differs from *Aguileria romualdoensis* sp. nov. by its more elongated anterior auricle and the shape of ligament pits. In fact, the pits in *Aguileria romualdoensis* sp. nov. are parabolic (Fig. 8A-B), whereas in *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1842) they are cylindrical (Fig. 10).

The other bakevelliid shell of the Romualdo Formation with a well-developed ligament area is *Aguileria dissita* (White, 1887a), described by Pereira (2015, p. 238, fig. 7a-c). However, in this species the ligament area seems very sub-rectangular, whereas in *Aguileria romualdoensis* sp. nov. it is clearly triangular (Fig. 8A-B). A precise morphological comparison between the two species is marred by the poor preservational state of the specimens figured in Pereira (2015, p. 238, fig. 7a-c).

Gen. et sp. indet.

Fig. 9

Examined material: Four left valves: DZP-20008, DZP-20126I, DZP-20483, and DZP-20564.

Additional material: DZP-20562I, DZP-20622BI, and DZP-20691I.

Measurements: Table 4.

Locality: Sobradinho section, Jardim town, Ceará State, northeastern Brazil.

Stratigraphic horizon: 0.7-m-thick succession of shell-rich limestone beds with undulating base and top in the upper part of the Romualdo Formation.

Occurrence. Jardim and Araripina towns, Ceará and Pernambuco states, northeastern Brazil, Romualdo Formation, Santana Group, Araripe Basin, Aptian-Albian.

Description: Shell small (maximum length: 22.7 mm), sub-trapezoidal; left valve strongly inequilateral. Dorsal margin straight; posterior margin with well-developed, but poorly demarcated wing; ventral margin strongly convex, anterior margin faintly convex with small but well-defined auricle (Fig. 9). Beak strongly prosogyrous, umbo of left valve curved towards dorsal margin. Ligament external, opisthodontic, multivincular. Ligament area poorly preserved with at least two ligament pits (Fig. 9A-B). Pallial line and muscle scars unknown. Shell ornamented with thin radial ribs well visible on the posterior wing. Radial rib density variable, higher at the umbones (Fig. 9). Shell surface with numerous rugae that intersect radials to produce a reticulate pattern (Fig. 9C). Right valve unknown.

Remarks: The pteriodean shells ornamented with ribs and rugae are here referred to as gen. et sp. indet. As commented above, due to their poor preservation it is difficult to compare the internal molds with other bivalves from the Romualdo Formation. The muscle scars, pallial line, and hinge are unknown and just one ligament pit is observed in the right valve of specimen DZP-20008 (Fig. 9A-B). However, this character differs from that in *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov. and *Aguileria romualdoensis* sp. nov. Moreover, the general external shell morphology also differs, being sub-trapezoidal, with a well-developed posterior wing and well

visible thin radial ribs (Fig. 9). Until better-preserved material becomes available, we prefer to keep the specimens assigned to gen. et sp. indet. in open nomenclature.

DISCUSSION

Stratigraphic and geographic distribution of the Romualdo bakevelliids

The first and last occurrences of bakevelliid bivalves in columnar sections along the outcrop belt of the Romualdo Formation are shown in Figure 3. In the Sobradinho section, the thickest and stratigraphically most complete sedimentary succession of the Romualdo Formation, the oldest record of bakevelliids is in mudstones located ~70 m above the contact with the underlying Crato Formation. This record is represented by just one poorly preserved specimen (a right valve) that cannot be assigned to any taxon. In this same section, youngest occurrence (a single left valve) is recorded ~14 m below the unconformity with the overlying Exu Formation. The main stratigraphic interval where bakevelliid bivalves are so abundant to form shell-rich carbonate rocks is in the upper third of the unit. Bakevelliids are found in a ~0.7-m-thick interval that contains mainly mudstones and shales with cm-thick shell-rich limestone beds, and the uppermost limestone bed is a typical bakevelliid coquina concentration (Fig. 11), i.e. a bakevelliid rudstone with subordinate gastropod shells. According to Fürsich et al. (2019), closed articulated bakevelliid specimens are also found at the base of the bed. On the top of this bed, closed articulated *in situ* bakevelliid shells occur. In an adjacent section, ~4.5-km away, in the region of Porteiras, bakevelliid-like bivalves have also been recorded in a cm-thick gastropod-rich limestone also containing rare echinoderms (Martill, 1993, p. 48; Sales, 2005).

A shell-rich limestone interval is also present in the Mãozinha section, located south of the town of Missão Velha (Figs. 2-3). Decimeter-thick shell concentrations, mainly composed of cassioid gastropods or bivalves (*Musculus* sp. or *Calva* sp.), are found in this interval (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019), but bakevelliids have not yet been described in this locality.

Rare bakevelliid occurrences have also been recorded locally at the upper part of the Romualdo Formation in the Estiva section, located in the central-north margin of the Araripe Basin, ~13 km of the Nova Olinda town (Figs. 2-3). Commonly, the specimens were found in the uppermost interval associated with gastropod-rich limestones. These occurrences can be laterally correlated with the occurrences in the Serra do Mãozinha section (Fig. 3).

Southward, in the Serra do Inácio, Araripina town, the bakevelliid-rich limestones have also been locally recorded at the upper part of the preserved sedimentary succession of the

Romualdo Formation (Fig. 3). Similarly to what was described in the Sobradinho section, the three identified species of bakevelliids are found in cm-thick, bedded limestones (Fig. 3). Also, in the surroundings of the Araripina town, the stratigraphic position of the bakevelliids described by Pereira et al. (2015) (*Aguileria dissita*) cannot be determined with precision. Locally, associated echinoid-bearing carbonate beds suggest correlation with the upper carbonate-dominated interval of the Romualdo Formation (Fig. 3).

In sum, despite the scattered occurrences of bakevelliids in some sections (i.e., Serra do Mãozinha and Estiva) these bivalves are extremely abundant in carbonate beds located in the upper third of the Romualdo Formation, just at the base of the second TR cycle described by Fürsich et al. (2019) (Fig. 3). Thus, this bakevelliid-rich interval is widely distributed at several fossil localities in the eastern and western parts of the Araripe Basin (Fig. 2), suggesting that marine waters flooded the whole basin.

Faunal composition, affinities and biocorrelation of the Romualdo bakevelliids

The new members of the family Bakevelliidae described here are represented by at least three new taxa, namely *Aguileria romualdoensis* sp. nov., *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., and Gen. et sp. indet. These taxa are added to those previously recorded from the Romualdo Formation, including *Aguileria* sp. (Beurlen, 1963, 1971a), *Aguileria dissita* (Pereira et al., 2015), and *Pseudoptera beurleni* (*nomem nudum*, in Bruno, 2009). The occurrence of the genus *Bakevella* was not confirmed by our taxonomic analyses. Anyway, the bakevelliids were a diverse group of marine epibenthic invertebrates within the epicontinental sea that briefly reached the Araripe Basin during the early Cretaceous. Of importance is the presence of the genus *Aguileria* White, 1887b, which is also common in the Lower Cretaceous succession of the Sergipe-Alagoas Basin (White, 1887a; Hessel and Filizola Jr., 1989). For example, the species *Aguileria dissita* recorded in carbonates of the Romualdo Formation from the western margin of the Araripe Basin (see Pereira et al., 2015) occur in the Upper Aptian-Albian Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin (White, 1887a; Hessel and Filizola Jr., 1989). The record of this species in coeval rocks of both sedimentary basins is a strong evidence that these units were, at least occasionally connected allowing the exchange of these bivalves.

This hypothesis is also supported by other groups of marine benthic macroinvertebrates. Many gastropod species recorded in the Riachuelo Formation, especially at the homonymous fossil locality in the State of Sergipe, are also present in the upper part of the Romualdo Formation. This is the case of the brackish to marine potamidid gastropods, including *Cerithium*

riachuelanum Maury, 1936, recently reported by Fürsich et al. (2019) in the Sobradinho section where the bakevelliids specimens are preserved. *Cerithium sergipensis* Maury, 1936 is the other cerithioidean gastropod from the Riachuelo Formation that has also been recorded in the upper part of the Romualdo Formation (Pereira et al., 2015). Stromboidean gastropods (i.e., Tylostomatidae), described as *Tylostoma ranchariensis* Pereira et al., 2015, from carbonates of the upper part of the Romualdo Formation are also represented by several species in the Riachuelo Formation (Maury, 1936). Finally, *Paraglauconia (Diglauconia) lyrica* Maury, 1936, which was first described for the Riachuelo Formation, is also very abundant in the carbonates of the upper part of the Romualdo Formation (Pereira et al., 2016), including those in the geological sections studied here.

Echinoids are other fully marine benthic macroinvertebrates found in the upper part of the Romualdo Formation that are also common in the Riachuelo Formation. The echinoderm fauna of the Romualdo Formation is known since the pioneer descriptions by Beurlen (1966), who described the cassiduloids *Pvgurus tinocoi* and *Bothryopneustes araripensis*. The other Romualdo echinoderms are the hemiasterid *Hemiaster proclivus* and the spatangoid *Douvillaster benguellensis* (Manso and Hessel, 2012). Indeed, both species are also recorded in the Sergipe-Alagoas Basin, *Hemiaster proclivus* in the Angico, Taquari and Maruim members of the Riachuelo Formation, and *Douvillaster benguellensis* in the Taquari Member of the same unit (Manso and Souza-Lima, 2003; Manso and Hessel, 2012).

In summary, many benthic macroinvertebrates present in the upper part of the Romualdo Formation, including at least, one bakevelliid species, four gastropod, and two echinoid species, are also recorded in the Cretaceous succession of the Sergipe-Alagoas Basin. In particular, they occur in the Taquari and Maruim members of the Riachuelo Formation, suggesting a accurate biocorrelation between these two formations (see also Manso and Hessel, 2012; Pereira et al., 2015, p. 244), which are today geographically separated by hundreds of kilometers (Fig. 1). Consequently, based on both literature information (i.e., Cassab, 2000; Manso and Hessel, 2012; Pereira et al., 2015; Fürsich et al., 2019) and on data presented here, the benthic fauna of the Romualdo Formation appears to be a slightly modified and impoverished of from that found in the Late Aptian-Early Albian Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin.

Paleogeographic implications

A marine-influenced sedimentation was previously documented for the upper part of the Aptian succession of the Araripe Basin (e.g., Assine, 1992; 1994; Assine et al., 2016; Beurlen,

1962; 1963; 1966; 1971a, b, c; Fürsich et al., 2019; Martill, 1993; 2007; Martill et al., 2007; Varejão et al., 2019). However, there is an endless discussion in the literature concerning the geographic position of the seaway (or seaways) that allowed ingressions of marine waters into the Araripe Basin during the early Cretaceous. A summary of the main ideas and arguments concerning this issue were recently presented by Arai (2014, 2016), and Assine et al. (2016).

Structural, stratigraphic and paleontological data support the hypothesis of the existence of a seaway connecting the Araripe and Sergipe-Alagoas basins through incised-valleys of the Recôncavo-Tucano rift system (Assine, 1992; 1994; Martill et al., 2007; Assine et al., 2016; Varejão et al., 2016; Freitas et al., 2017). The stratigraphic correlation of part of the Lower Cretaceous sedimentary succession of these basins can also be firmly constrained (Varejão et al., 2016). Paleocurrent data obtained in fluvial facies from the underlying Barbalha Formation (Araripe Basin) and Marizal Formation (Recôncavo-Tucanobasins) indicate southward-oriented paleo-drainage from the Araripe towards the Recôncavo basin (Assine, 1994; Assine et al., 2016; Varejão et al., 2016; Freitas et al., 2017). The fluvial valleys of this former paleo-drainage system provided a natural pathway for a marine ingression towards north, ultimately culminating in a huge interior flooded area and deposition of the marine stratigraphic succession recorded in the Romualdo Formation (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). Based on macroinvertebrates, the upper part of the Romualdo Formation can be closely correlated with part of the Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin, supporting a paleogeographic scenario whereby the marine waters flooding the northeastern Brazilian interior entered from the south and southeast (see also Martill, 1993; Assine, 1994; Martill et al., 2007; Assine et al., 2016).

The Bakevelliid-Sea of the Araripe Basin

As discussed above, in the Aptian sedimentary succession of the Araripe Basin there was a time when shallow, carbonate-bearing benthic bottoms were dominated by bakevelliid bivalves. In the eastern border of the Araripe Basin, this interval can be firmly established by outcrop data, where bakevelliid-bearing floatstones and rudstones with subordinated gastropod shells are recorded in the upper part of the Romualdo Formation (Fig. 3). Stratigraphic information suggests that towards the western margin of the basin, this interval is represented by bakevelliid- and echinoderm-bearing limestones, in the Araripina region (Pereira et al., 2015; 2017) and by the stromatolite fields of the Simões region, Piauí State (Varejão et al. 2019). During this time the whole basin was flooded, and an epeiric sea covered part of the

northeastern Brazilian territory. The benthic invertebrate assemblages that thrived during this phase characterized by the Bakevelliid-Sea and associated rocks was characterized by their low diversity (Fürsich et al., 2019). Typically, the assemblages are composed by bivalves, such as bakevelliids (46.6%), *Calva* sp. A (19%), *Sinonia* sp. (8.2%), *Calva* sp. B (2.3%), and lucinids (2.3%), as well as gastropods “*Cerithium*” *sergipense* (14.4%), *Gymnentome* (*Craginia*) *beurleni* (5.4%), and ampullinids (1.8%) (Fürsich et al., 2019). Detailed taphonomic analysis of the bakevelliid-bearing rudstones of the Sobradinho section indicates that the dominance of these epifaunal suspension feeding bivalves occurred just after the decline of the infaunal suspension feeding bivalves, such as *Sinonia* sp. (Fürsich et al. 2019).

The presence of *Aguileria dissita* in the bakevelliid-dominated assemblages of the Romualdo Formation, among other invertebrates (see above), indicates a direct link between the Araripean Bakevelliid-Sea and the coeval marine ecosystems of the Sergipe-Alagoas Basin (see also Pereira et al., 2015). In the Sobradinho section, the fate of the Bakevelliid-Sea is well recorded in the upper part of the Romualdo Formation (Fig. 3), where tide-dominated coastal deposits are characterized by heterolithic facies with flaser, wavy and lenticular bedding, sigmoidal cross-bedded sandstones with mud drapes in the foresets and interbedded massive silty sandstones with carbonized plant remains and non-marine palynomorphs (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). These facies are recorded immediately above the last bakevelliid-bearing rudstone beds (Fig. 3), showing a drastic change in the shallow water carbonate-dominated environments where bakevelliid bivalves thrived.

CONCLUSIONS

(a) Three new Aptian bakevelliid taxa were described and illustrated in detail. Together with the other known members of the family Bakevelliidae already recorded from the Romualdo Formation, the new bivalves (i.e., *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., *Aguileria romualdoensis* sp. nov., and gen. et sp. indet.) indicate that, at least, four species occurred in the Lower Cretaceous succession of the Araripe Basin. Therefore, the bakevelliid fauna of the Romualdo Formation was more diverse than previously thought.

(b) The bakevelliid-rich shell beds in the carbonate-dominated interval present in the upper part of the Romualdo Formation in Sobradinho section can be firmly correlated with the stratigraphic interval from the upper part of this unit yielding *Paraglauconia*-bearing concentrations in shales and limestones in Serra do Mãozinha section and the gastropod-rich limestones with bakevelliids in the Estiva section, all located in the eastern side of the

basin..This interval can also be tracked in outcrops in the western side of the Araripe basin, and noteworthily represented by bakevelliid- and echinoderm-bearing limestones in the Araripina region (Pereira et al., 2015; 2017) and by the stromatolite fields described in outcrops farwest in the Piauí State (Varejão et al. 2019). This stratigraphic interval and their benthic macroinvertebrates clearly document flooding of marine waters in the Araripe Basin, coinciding with an period in which larger areas of the northeastern Brazilian territory were inundated (see also Martill, 1993, p. 72). At present, the bakevelliid bivalves are the only group of marine benthic macrofossils that are found in the entire basin along the slopes of the Araripe plateau, characterizing a short-lived Bakevelliid-Sea within the Araripe Basin;

(c) *Aguileria romualdoensis* sp. nov. closely resembles *Aguileria renauxiana* (Mathéron, 1842, in Muster, 1995, p. 20) from the Cenomanian Woodbine Formation, Texas (Stephenson, 1952). In addition, *Aguileria dissita* from grainstones at the western margin of the Araripe Basin, Pernambuco State, is also recorded in the Upper Aptian-Albian Riachuelo Formation of the Sergipe-Alagoas Basin (White, 1887a; Maury, 1936). Therefore, two Aptian bakevelliid species of the genus *Aguileria* are shared with Late Cretaceous faunas of the Tethyan realm. This Lower Cretaceous bakevelliid genus probably was originated in Brazil and reached Tethyan regions during the Cenomanian, when the geographic barriers associated with the opening of the South Atlantic Ocean were less effective (see also Koutsoukos et al. 1991), favoring an exchange with Tethyan faunas;

(d) Finally, sedimentologic, stratigraphic and paleontological information indicates that the fate of the Bakevelliid-Sea of the Araripe Basin was linked to the onset of continentalization of the basin.

ACKNOWLEDGMENT

We thank MSc. João G. Bondioli, MSc. Michele A. Custódio and MSc. Victor R. da Silva for their help during the field trips in the Araripe Basin. Financial support to this project was provided by FAPESP, 18/01750-7, 16/13214-7, and 17/20803-1. Partial financial support was also offered by CNPq (401039/2014-5, 304800/2017-1), and Petrobras (2014/00519-9). This work was made with institutional support of the São Paulo State University. M.L. Assine, L.V. Warren and M.G. Simões are fellows of CNPq. M.G. Rodrigues and S.A. Matos are fellows of FAPESP.

REFERENCES

- Abdel-Gawad, G.I., 1986. Maastrichtian non-cephalopod mollusks (Scaphopoda, Gastropoda and Bivalvia) of the Middle Vistula Valley, Central Poland. *Acta Geologica Polonica* 36, 69–224.
- Aberhan, M., Muster, H., 1997. Palaeobiology of Early Jurassic bakevelliid bivalves from Western Canada. *Palaeontology* 40, 799–815.
- Arai, M., 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology* 44, 339–350. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020012>
- Arai, M., 2016. Reply to the comments of Assine et al. (Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective”). *Brazilian Journal of Geology* 46, 9–13. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150046B>
- Arai, M., Coimbra, J.C., 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: *Atas do I Simpósio sobre a da Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato-CE*, pp. 225–239.
- Assine, M.L., 1990. Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil (Unpubl. Master Thesis). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 124 pp.
- Assine, M.L., 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 22, 289–300.
- Assine, M.L., 1994. Paleocorrentes e paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 24, 223–232.
- Assine, M.L., 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 371–389.
- Assine, M.L., Perinotto, J.A. de J., Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., Mescolotti, P.C., 2014. Depositional sequences of the Alagoas Stage, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Boletim de Geociências da Petrobras* 22, 3–28.
- Assine, M.L., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., 2016. Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: A paleontological perspective.” *Brazilian Journal of Geology* 46, 3–7. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150046A>

- Beurlen, K., 1944. Beiträge zur Stammesgeschichte der Muscheln. Bayerische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte 1–2, 133–145.
- Beurlen, K., 1962. A Geologia da Chapada do Araripe. Anais da Academia Brasileira de Ciências 34, 365–370.
- Beurlen, K., 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. In: XVII Congresso Nacional de Geologia, Recife-PE, pp. 1-47.
- Beurlen, K., 1966. Novos equinoides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 389, 455-464.
- Beurlen, K., 1971a. A paleontologia na geologia do Cretáceo no Nordeste do Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 43, 89-101.
- Beurlen, K., 1971b. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). Anais da Academia Brasileira de Ciências 43, 411–415.
- Beurlen, K., 1971c. Bacias sedimentares do bloco brasileiro. Estudos Sedimentológicos 1, 7-32.
- Bieler, R., Carter, J.G., Coan, E. V., 2010. Classification of bivalve families. *Malacologia* 52, 113–133.
- Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, S., 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31 International Geological Congress, 151–182.
- Bruno, A.P.S., 2009. Paleontologia da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil: histórico, evidências marinhas e uma nova espécie de bivalvío (Unpubl. PhD. Dissertation). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 83 pp.
- Cassab, R.C.T. 2000. Os fósseis da Bacia de Sergipe-Alagoas: os gastrópodos. *Phoenix* 20, 1-2.
- Coimbra, J.C., Arai, M., Carreño, A.L., 2002. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Geobios* 35, 687–698. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(02\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00082-7)
- Cox, L.R., 1969. Family Bakevelliidae, In: Moore, R.C., Teichert, C. (Eds.), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part N, Mollusca* 6, Bivalvia 1. Geological Society of America/University of Kansas Press, Boulder/Lawrence, N306–N310.
- Crampton, J.S., 1988. Comparative taxonomy of the bivalve families Isognomonidae, Inoceramidae, and Retroceramidae. *Palaentology* 31, 965–996.

- Custódio, M.A., 2017. Arquitetura estratigráfica da Formação Romualdo, pós-rifte da Bacia do Araripe (Unpubl. Master Thesis). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 103 pp.
- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T., Perinotto, J.A.J., Assine, M.L., 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology* 359, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.07.010>
- Defrance, M.J.L., 1820. Gervillie, Gervillia. *Dictionaire des Sciences Naturelles* 18, 502-503.
- Fara, E., Saraiva, A.Á.F., Campos, D.D.A., Moreira, J.K.R., Siebra, D.D.C., Kellner, A.W.A., 2005. Controlled excavations in the Romualdo Member of the Santana Formation (Early Cretaceous, Araripe Basin, northeastern Brazil): Stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 218, 145–160. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.12.012>
- Freitas, B.T., Almeida, R.P., Carrera, S.C., Figueiredo, F.T., Turra, B.B., Varejão, F.G., Assine, M.L., 2017. Aptian sedimentation in the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift System and its tectonic and paleogeographic significance. *Journal of South America Earth Science* 80, 460–481. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.10.001>
- Fürsich, F.T., Custódio, M.A., Matos, S.A., Hethke, M., Quaglio, F., Warren, L.V., Assine, M.L., Simões, M.G., 2019. Analysis of a Cretaceous (late Aptian) high-stress ecosystem: The Romualdo Formation of the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Cretaceous Research* 95, 268–296. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.11.021>
- Gray, J.E., 1847. A list of genera of recent Mollusca, their synonyms and types. *Proceedings of the Zoological Society of London* 15, 129–219.
- Grobben, C., 1894. Zur Kenntniss der Morphologie, der Verwandtschaftsverhältnisse und des Systems der Mollusken. *Akademie der Wissenschaften Wien, Sitzungsberichte* 103, 61–86.
- Guimarães, D., 1964. *Geologia do Brasil*. Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro., 674 pp.
- Hallam, A., Biró-Bagócsky, L., Perez, E., 1986. Facies analysis of the Lo Valdés Formation (Tithonian-Hauterivian) of the High Cordillera of central Chile, and the palaeogeographic evolution of the Andean Basin. *Geological Magazine* 123, 425–435. <https://doi.org/10.1017/S0016756800033513>

- Hartt, C.F., 1870. Geology and physical geography of Brazil. In: Agassiz, L. (Ed.), Scientific Results of a Journey in Brazil. Fields, Osgood & Co, Boston, pp. 1-620.
- Hessel, M.H., Filizola Jr., N.P., 1989. Algumas espécies de *Aguileria* (Bivalvia) do Albiano Inferior de Sergipe. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Paleontologia., Curitiba (PR), 301–315.
- Heinberg, C., 1999. Lower Danian bivalves, Stevns Klint, Denmark: Continuity across the K/T boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 154, 87–106. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00088-7)
- Hessel, M.H., 2004. *Gervillia* (*Gervillia*) *solenoides* DeFrance, 1820 (Bivalvia, Bakevelliidae) do Neo-Aptiano de Sergipe, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 7, 67–76. <https://doi.org/10.4072/rbp.2004.1.05>
- Kegel, W., 1957. Novo Membro Fossilífero da Formação Itamaracá (Cretáceo Superior) de Pernambuco. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 29, 373–375.
- King, W., 1848. A catalogue of the Organic Remains of the Permian rocks of Northumberland and Durham. Newcastle-upon-Tyne, 16 pp.
- King, W., 1850. A monograph of the Permian fossils of England. *Palaeontographical Society Monographs* 3, 1–258, 28 pls.
- Koutsoukos, E.A.M., Mello, M.R., Azambuja Filho, N.C., Hart, M.B., Maxwell, J.R., 1991. The Upper Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, Brazil: An integrated paleoenvironmental assessment. *AAPG Bulletin* 75, 479-498.
- Lazo, D.G., 2003. Taxonomy, facies relationships and palaeobiology of bakevelliid bivalves from the Lower Cretaceous of west-central Argentina. *Cretaceous Research* 24, 765–788. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2003.09.001>
- Linnaeus, C., 1758. *Systema naturae per tria regna naturae*. Editio decima, 1. Laurentius, Stockholm, 1–824.
- Mabesoone, J.M., Tinoco, I.M., 1973. Paleocology of Aptian Santana Formation (northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 14, 87–118.
- Maisey, J.G., 1991. *Santana Fossils – An Illustrated Atlas*. THF Publications, Neptune, New York.
- Manso, C.L.C., Souza-Lima, W., 2003. O equinóide *Douvillaster* Lambert, 1917 na Formação Riachuelo, Bacia de Sergipe, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 5, 29–37.

- Manso, C.L.C., Hessel, M.H., 2012. Novos equinoides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 42, 187–197.
- Martill, D.M., 1993. Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil, Palaeontological Association Field Guides to Fossils, Number 5.
- Martill, D.M., 2007. The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of north-east Brazil: a historical review and an appraisal of the biochronostratigraphic utility of its palaeobiota. *Cretaceous Research* 28, 895–920. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2007.01.002>
- Martill, D.M., Bechly, G., Loveridge, R.F., 2007. The Crato Fossil beds of Brazil - Window into an Ancient World. Cambridge University Press, New York.
- Mathéron, P., 1842. Catalogue méthodique et descriptif des Corps organisés fossiles du département des Bouches-du-Rhone et lieux circonvoisins; précédé d'un Mémoire sur les terrains supérieurs au grès bigarré de S. E. de la France. *Repertoire des travaux de la Société de statistique de Marseille* 6, 81-341.
- Matos, R.M.D., 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics* 11, 766–791.
- Maury, C.J., 1936. O Cretáceo de Sergipe. *Monografia do Serviço Geológico e Mineração do Brasil* 11, 1-283.
- Mello, L.H.C., Mello, F.T., Zucon, M.H., 2007. A new species of *Gervillia* Defrance (Bivalvia, Bakevelliidae) from the Aptian-Albian transition of Sergipe, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia* 10, 63–69.
- Muster, H., 1995. Taxonomie und Paläobiogeographie der Bakevelliidae. *Beringeria* 14, 3–161.
- Neumann, V.H., Assine, M.L., 2015. Stratigraphic Proposal to the Post-Rift I Tectonic-Sedimentary Sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. In: *Strati 2015 – 2nd International Congress on Stratigraphy*. *Berichte des Institutes für Erdwissenschaften der Universität Graz*, pp. 274.
- Newell, N.D., 1965. Classification of the Bivalvia. *American Museum Novitates* 2206, 1–25.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., Almeida, J.A.C., 2015. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano- Albiano, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Ciências Naturais do Museu Paraense Emílio Goeldi* 533, 231–246.
- Pereira, P.A., Cassab, R. de C.T., Barreto, A.M.F., 2016. Cassiopidae gastropods, influence of Tethys Sea of the Romualdo Formation (Aptian-Albian), Araripe Basin, Brazil. *Journal of South America Earth Science* 70, 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.005>

- Pereira, P.A., Cassia, R., Cassab, T., Magnólia, A., Barreto, F., 2017. Paleoeologia e Paleogeografia dos Moluscos e Equinóides da Formação Romualdo, Aptiano – Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 40, 180–198.
- Pereira, P.A., Cassia, R., Cassab, T., Magnólia, A., Barreto, F., 2018. As Famílias Veneridae, Trochidae, Akeridae e Acteonidae (Mollusca), na Formação Romualdo: Aspectos Paleocológicos e Paleobiogeográficos no Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe, NE do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 41, 137–152.
- Prado, L.C., Luque, J., Franca Barreto, A., Palmer, A.R., 2018. New brachyuran crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: evidence for a Tethyan connection to the Araripe Basin. *Acta Palaeontologica Polonica* 63, 737–750. <https://doi.org/10.4202/app.00480.2018>
- Rodrigues, M.G., 2020. Bivalves Bakevelliidae da Formação Romualdo (Andar Alagoas, Cretáceo Inferior), Bacia do Araripe, NE Brasil: significado paleoambiental e paleogeográfico (Unpubl. Master Thesis). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, Rio Claro, 134 pp.
- Rosa, M.C., Assine, M., Morales, N., 2019. Araripe Basin: Strike-slip tectonics during rift phase in the interior of northeast Brasil. In: XVII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Bento Gonçalves (RS), pp.181.
- Sales, A.M.F., 2005. Análise tafonômica das ocorrências fossilíferas de macroinvertebrados do Membro Romualdo (Albiano) da Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil: significado estratigráfico e paleoambiental (Unpubl. PhD Dissertation). Universidade de São Paulo, São Paulo, 173 pp;
- Stephenson, L.W., 1952. Larger invertebrate fossils of the Woodbine Formation (Cenomanian) of Texas. *United States Geological Survey Professional Paper*. 242, 1–226.
- Tëmkin, I., 2006. Morphological perspective on the classification and evolution of Recent Pterioidea (Mollusca: Bivalvia). *Zoological Journal of the Linnean Society* 148, 253–312. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2006.00257.x>
- Valença, L.M.M., Neumann, V.H., Mabesoone, J.M., 2003. An overview on Callovian - Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: Onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geologica Acta* 1, 261–275.
- Varejão, F.G., Warren, L.V., Perinotto, J.A. de J., Neumann, V.H., Freitas, B.T., Almeida, R.P. de, Assine, M.L., 2016. Upper Aptian mixed carbonate-siliciclastic sequences from Tucano Basin, Northeastern Brazil: Implications for paleogeographic reconstructions following

Gondwana break-up. *Cretaceous Research* 67, 44–58.
<https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.06.014>

- Varejão, F.G., Fürsich, F.T., Warren, L.V., Matos, S.A., Rodrigues, M.G., Assine, M.L., Sales, A.M.F., Simões, M.G., 2019. Microbialite fields developed in a protected rocky coastline: The shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil). *Sedimentary Geology* 389, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.06.003>
- Von der Osten, E., 1957. A fauna from the Lower Cretaceous Barranquín Formation of Venezuela. *Journal of Paleontology* 31, 571–590.
- White C. A., 1887a. Contribuições à Paleontologia do Brasil. *Archivos do Museu Nacional do Rio Janeiro* 7, 1–123.
- White, C.A., 1887b. On new generic forms of Cretaceous mollusca and their relation to other forms. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 39, 32–37.

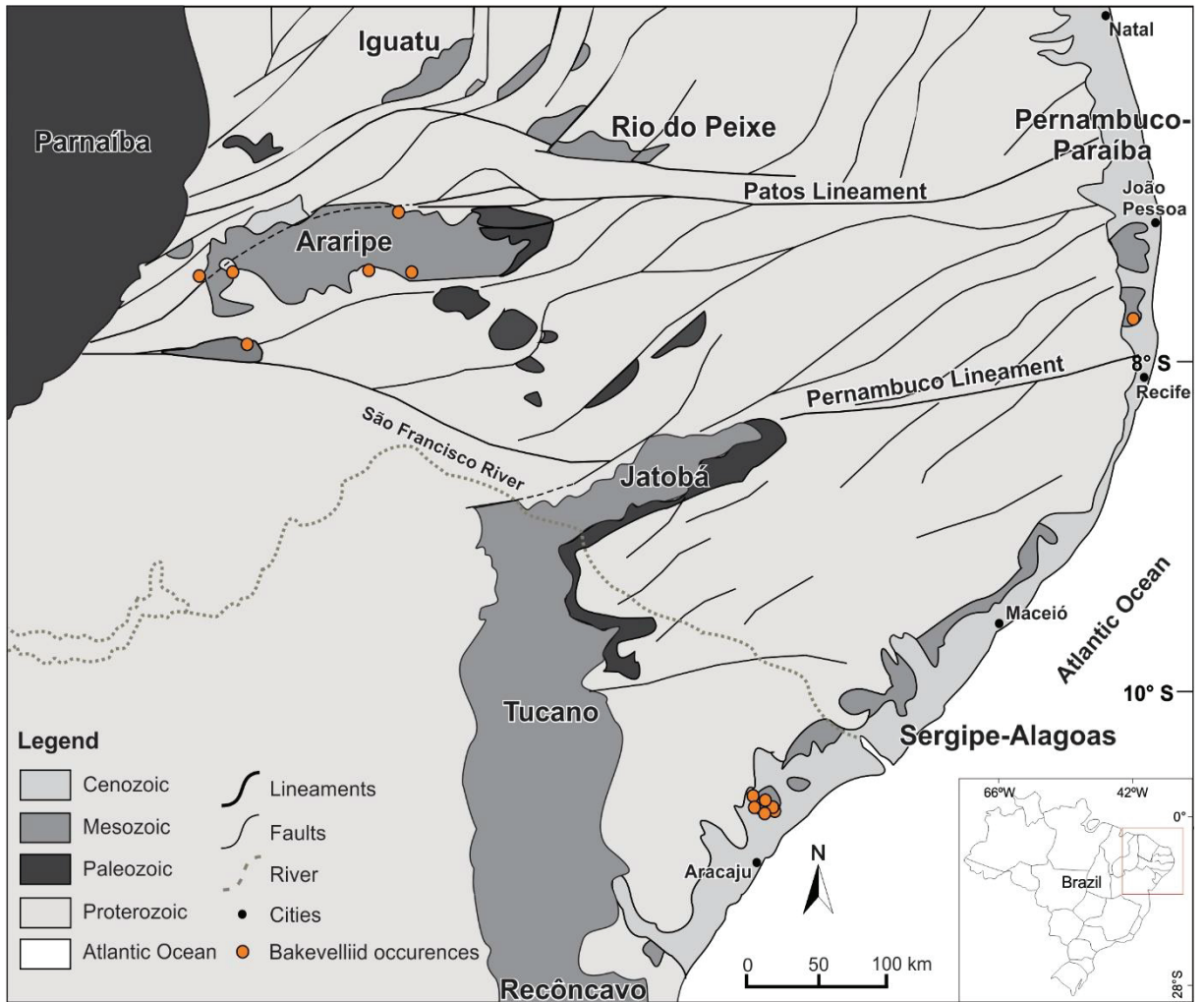


Fig. 1. Brazilian Cretaceous bakevelliid-bearing fossil localities. Source map from Assine (1990).

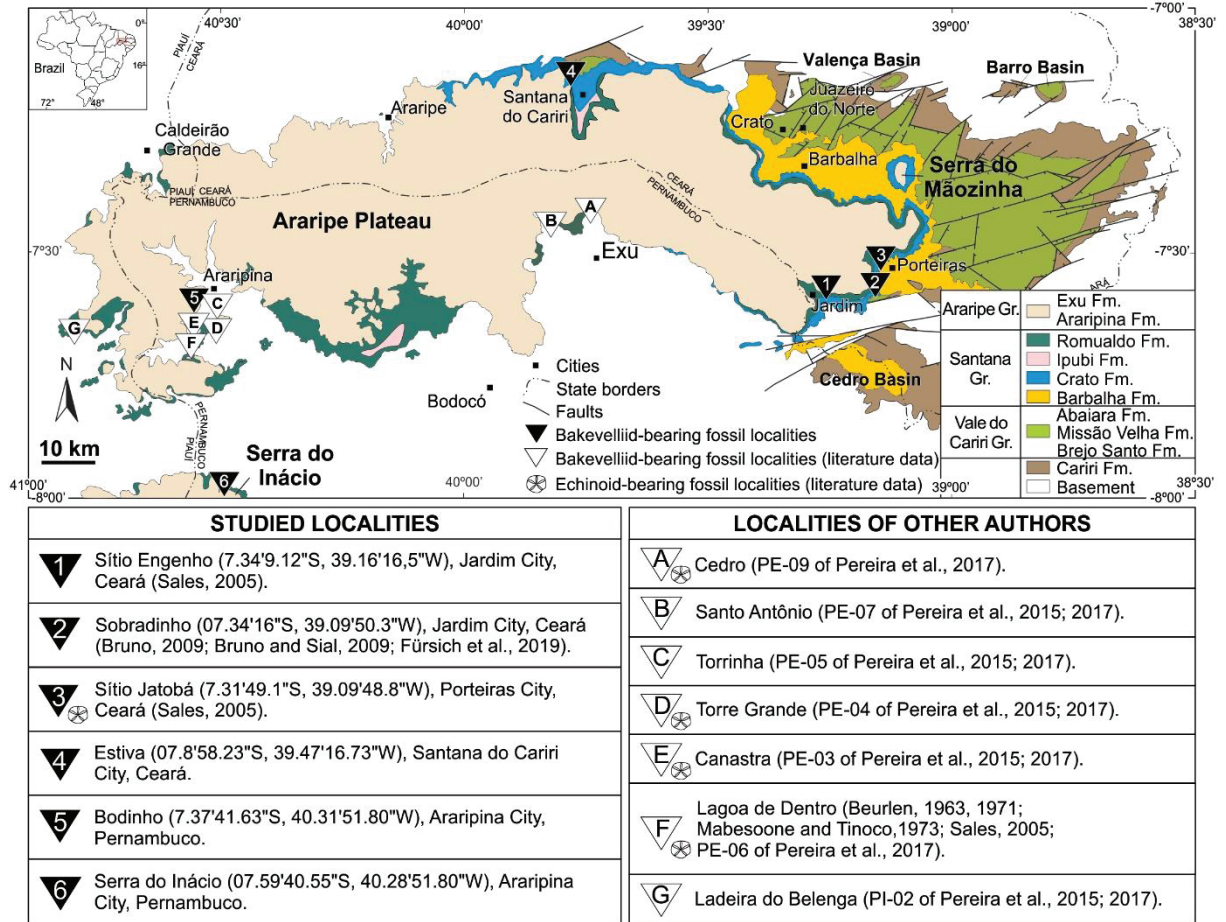


Fig. 2. Geologic map of the Araripe Basin, NE Brazil, with locations of the fossil sites studied. Abbreviations: Fm. – Formation; Gr. – Group. Modified from Assine et al. (2014), Custódio et al. (2017), and Varejão et al. (2019).

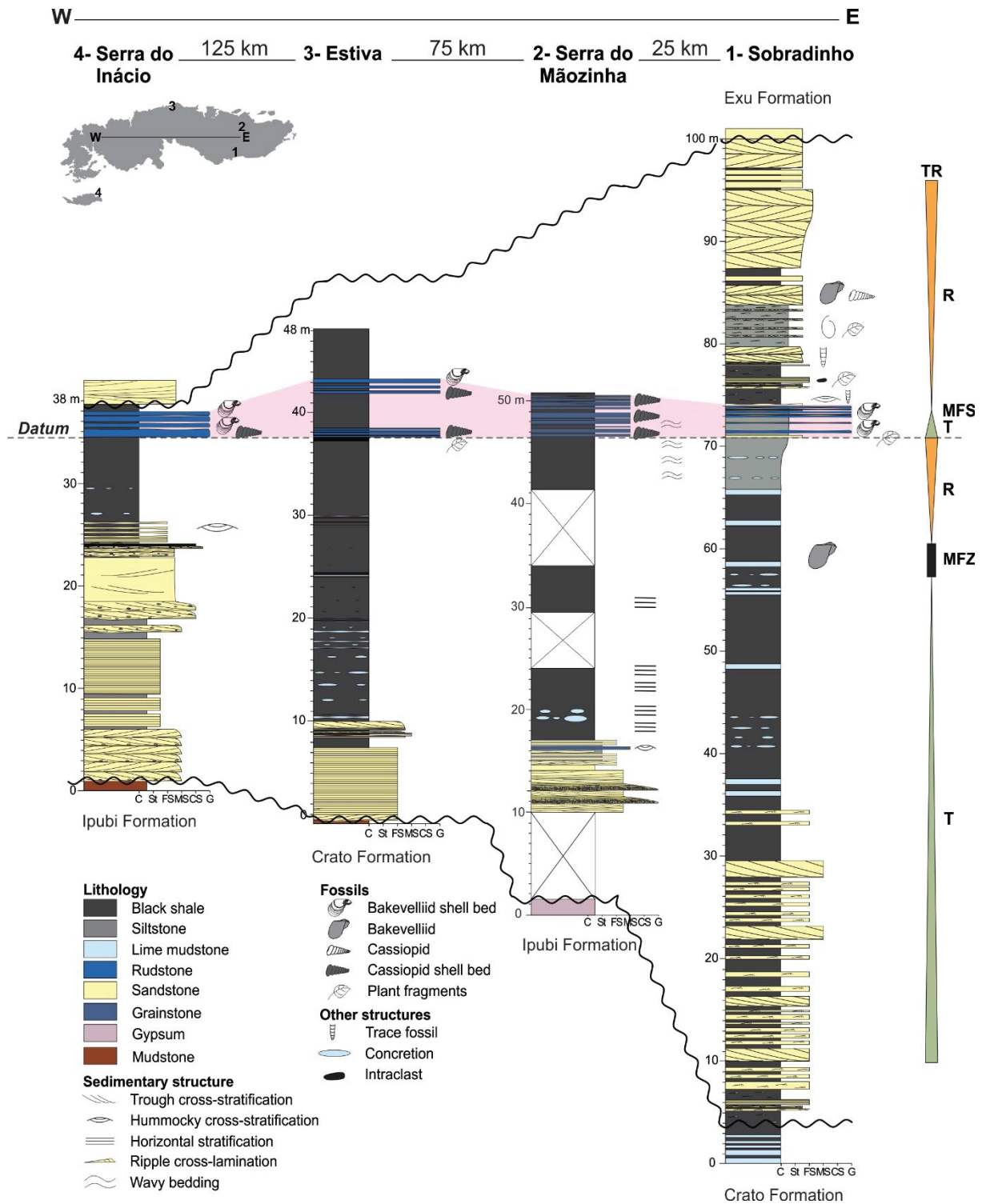


Fig. 3. Columnar sections of the Romualdo Formation, Araripe Basin, NE Brazil. The main marine bakevelliid-rich stratigraphic interval is highlighted. Abbreviations: C – clay; St – silt, FS – fine sandstone; FM – medium sandstone; CS – coarse sandstone; G – granule; MFS – Maximum Flooding Surface; MFZ – Maximum Flooding Zone; R – Regressive; T –

Transgressive; TR – Transgressive-regressive. Modified from Custódio et al. (2017), Fürsich et al. (2019) and Varejão et al. (2019).

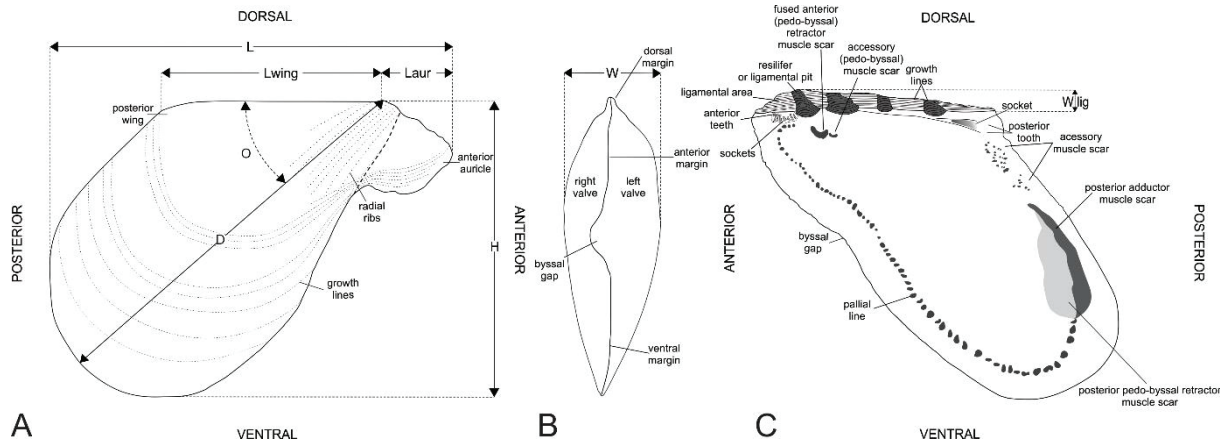


Fig. 4. Drawings summarizing the main bakevelliid shell characters and measurements used in this study. A. Right valve, lateral view, showing the external shell characters. B. Closed articulated valves, anterior view. C. Right valve showing the main internal shell characters, especially the muscle scars, hinge and ligament structures. Based on Muster (1995) and Lazo (2003). Abbreviations: D – length of central body, H – height, L – length, Lwing – wing length, Laur – auricle length, O – Obliquity, W – width of the two valves, Wlig – ligament width.

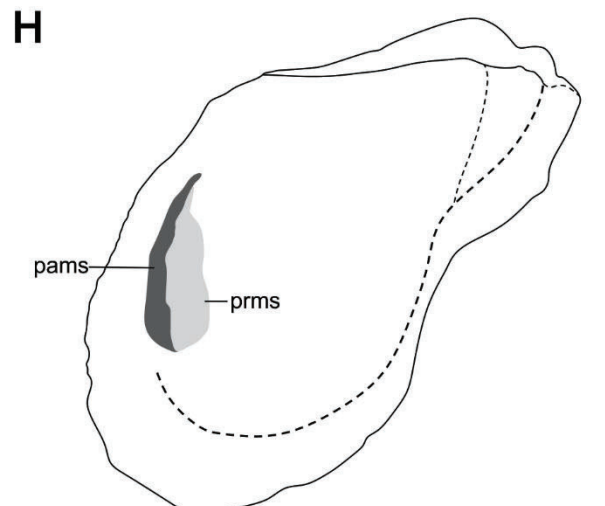
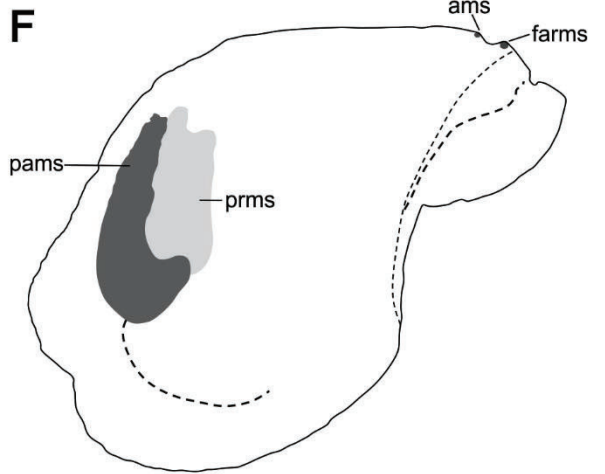
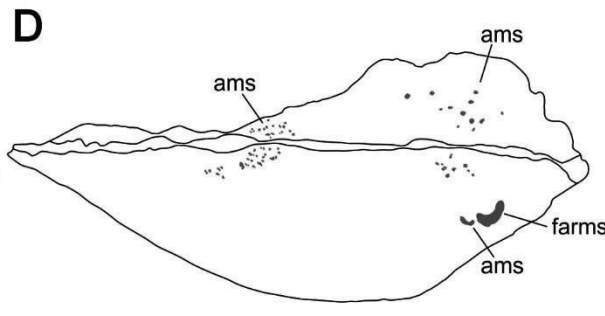
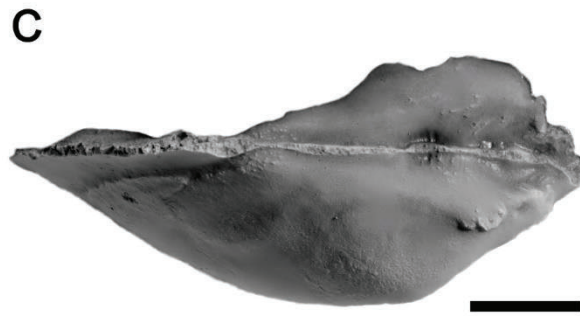
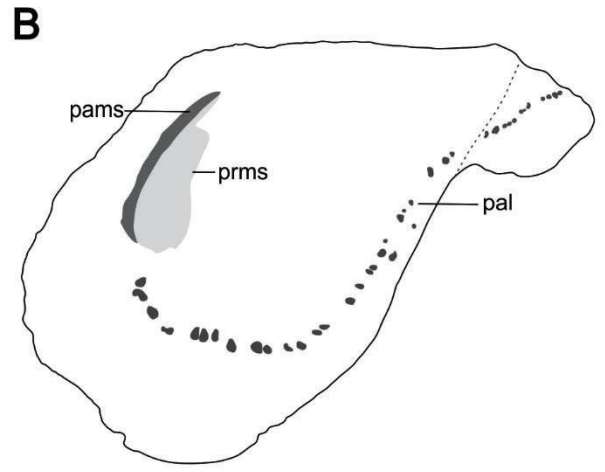
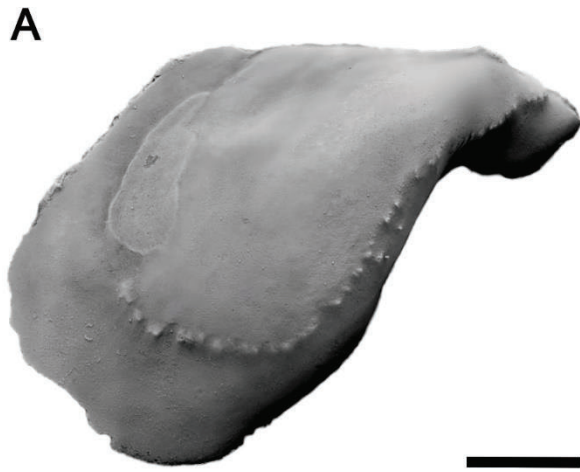


Fig. 5. *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., Romualdo Formation (Aptian), general morphology and muscle scars. A, E, G. Internal molds of right valves, showing the muscle scars and pallial line (DZP-20464 [holotype], DZP-20521BII [paratype], DZP-20654 [paratype], respectively). C. Dorsal view, internal mold of articulated valves, note the accessory muscle scars and fused anterior (pedo-byssal) retractor muscle scar (DZP-20464 [holotype]). B, D, F, H. Drawings showing details of the muscle scars, same specimens. Abbreviations: ams – accessory muscle scars, farms – fused anterior (pedo-byssal) retractor muscle scar, pal – pallial line, pams – posterior adductor muscle scar, prms – posterior pedo-byssal retractor muscle scar. Scale: 5 mm.

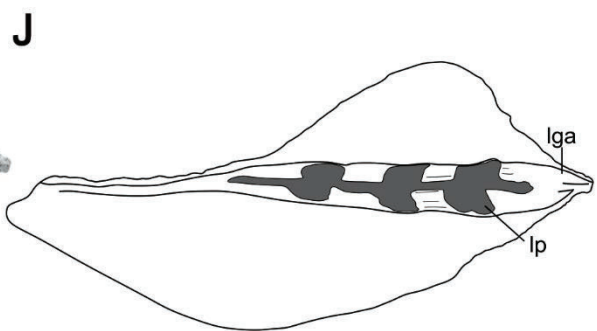
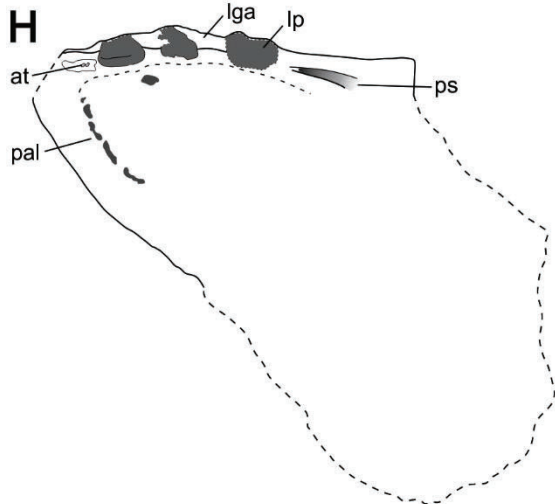
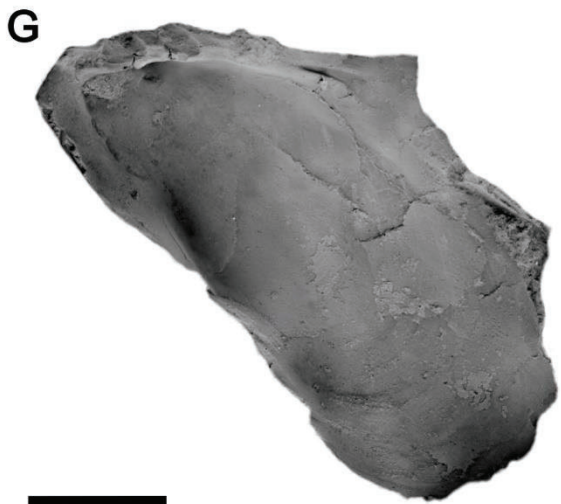
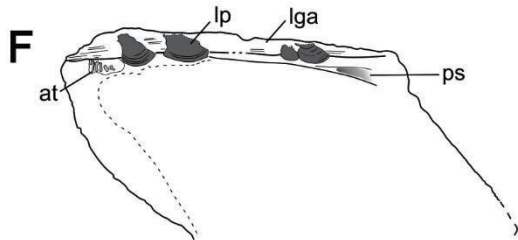
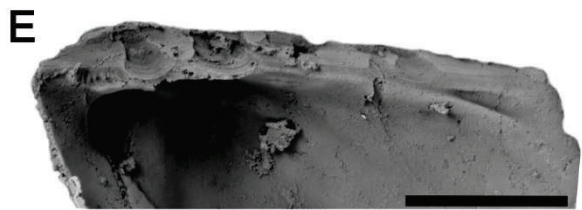
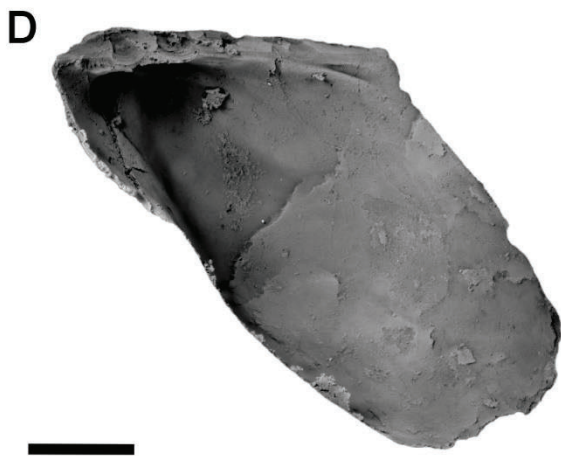
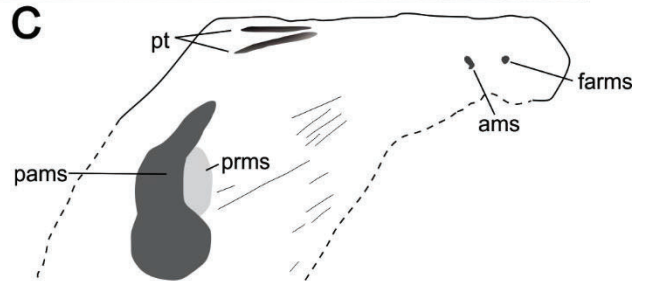
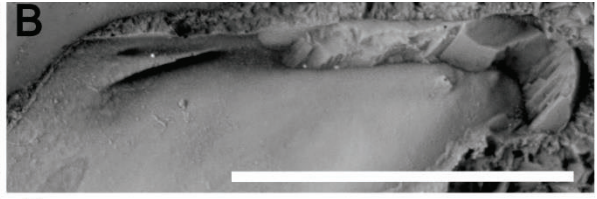
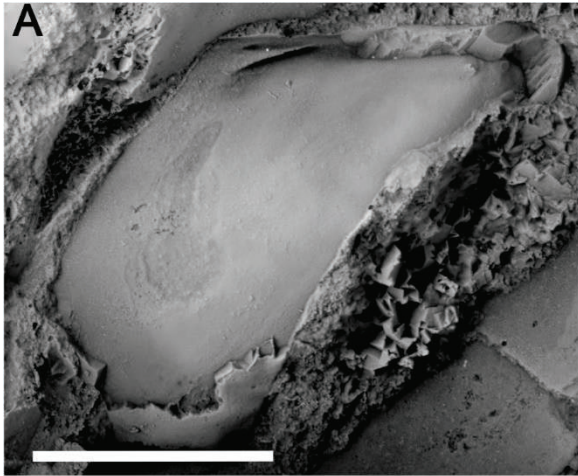


Fig. 6. *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., Romualdo Formation (Aptian), general morphology, and details of the muscle scars and hinge area. A. Internal molds of right valve, lateral view, DZP-20707. B. Same specimen, close-up of the hinge area showing the posterior teeth. C. Drawing of the same specimen, showing the internal shell characters. D. Latex cast, right valve, showing the hinge area, DZP-20625I. E. Close-up of the same specimen (latex cast), note the ligament pits and teeth. F. Drawing of the same specimen (latex cast), demonstrating details of the ligament area, hinge and muscle scars. G. Latex cast, right valve, DZP-19978I. H. Drawing of the same specimen (latex cast) with details of the ligament area, pits and muscle scars. I. Latex cast of closed articulated valves, dorsal view, showing the ligament area and associated pits, DZP-20610I. J. Drawing of the same specimen. Abbreviations: at – anterior teeth, ams – accessory muscle scars, farms – fused anterior (pedo-byssal) retractor muscle scar, lga – ligament area, lp – ligament pit, pal – pallial line, ps – posterior socket, pt – posterior teeth, pams – posterior adductor muscle scar, prms – posterior pedo-byssal retractor muscle scar. Scale: 5 mm.

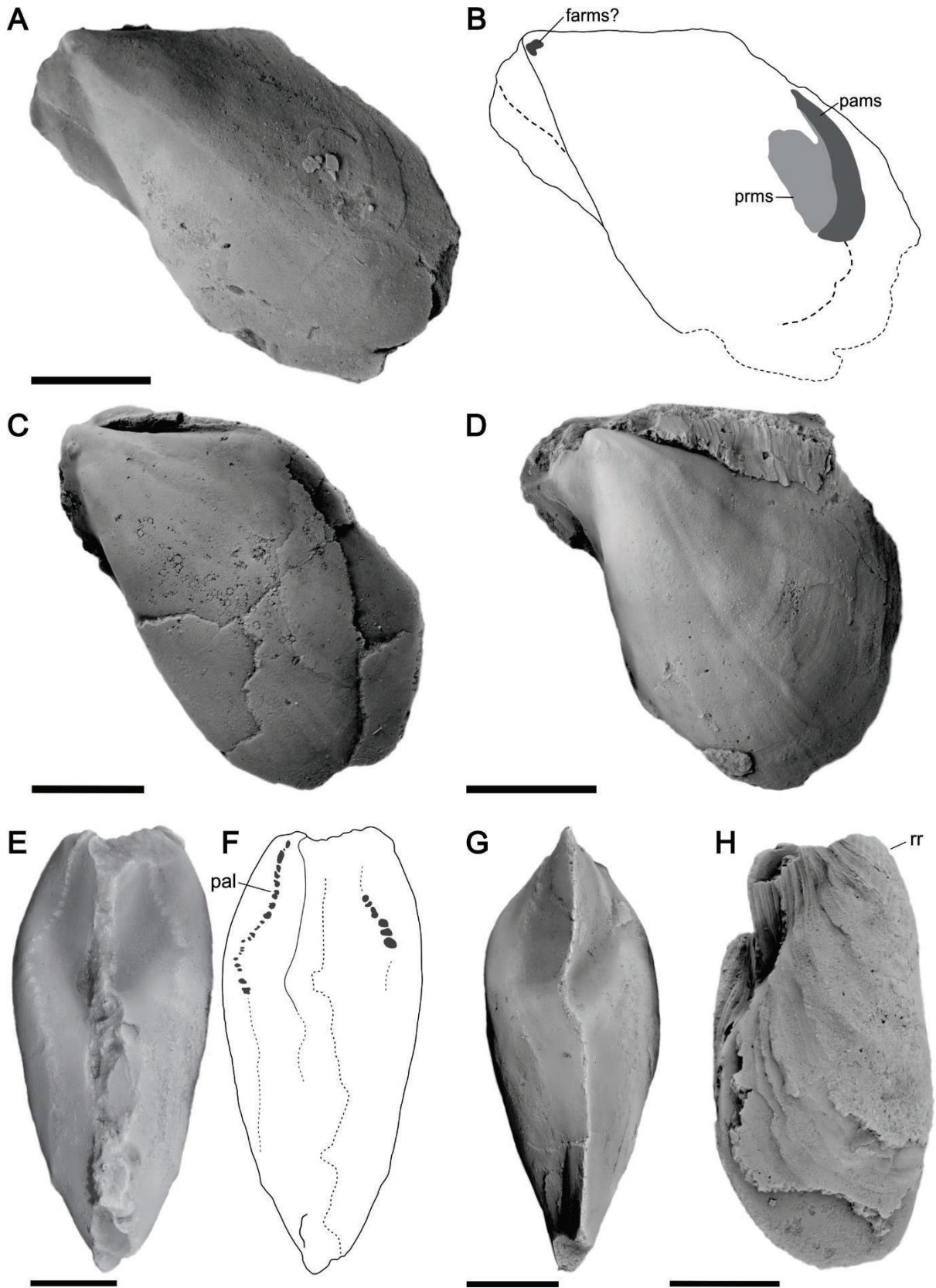


Fig. 7. *Araripevella musculosa* gen. et sp. nov., Romualdo Formation (Aptian), general morphology and muscle scars. A, C-D. Internal molds of left valve, lateral view, DZP-20716,

DZP-19988II [paratype], and DZP-20649, respectively. B. Drawing of the same specimen in A, showing muscle scars and part of the pallial line. E, G. Closed articulated specimens, internal molds, anterior view, DZP-20647 and DZP-20463. F. Sketch of the same specimen in E. H. Left valve of a specimen with preserved shell, DZP-20655. Note the ornamentation. Abbreviations: farms – fused anterior (pedo-byssal) retractor muscle scar, pal – pallial line, pams – posterior adductor muscle scar, prms – posterior pedo-byssal retractor muscle scar, rr – radial ribs. Scale: 5 mm.

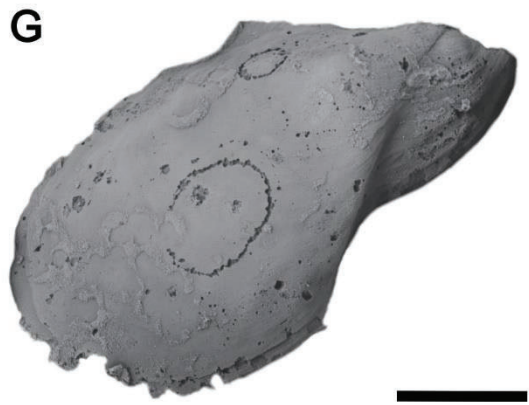
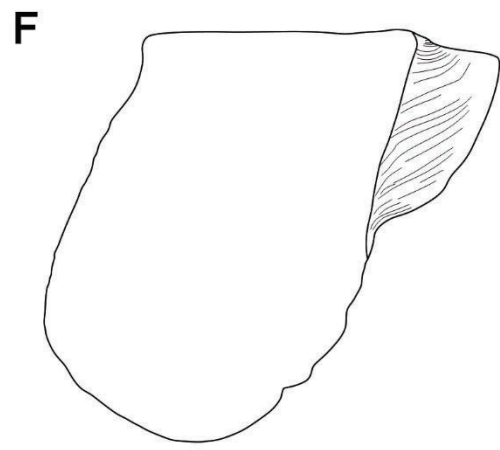
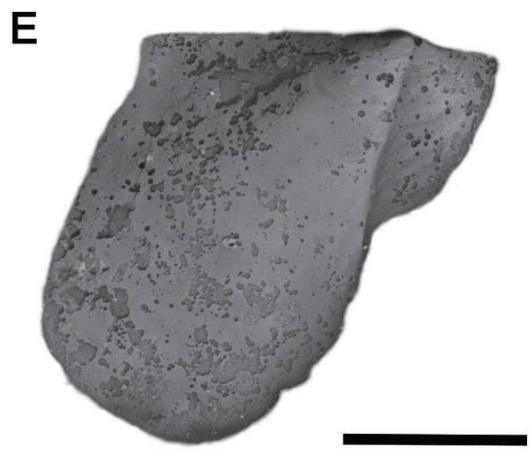
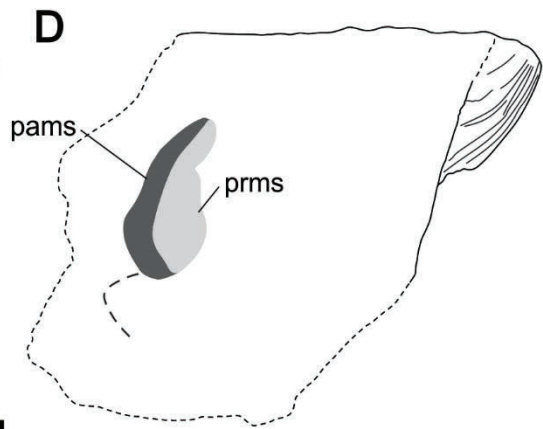
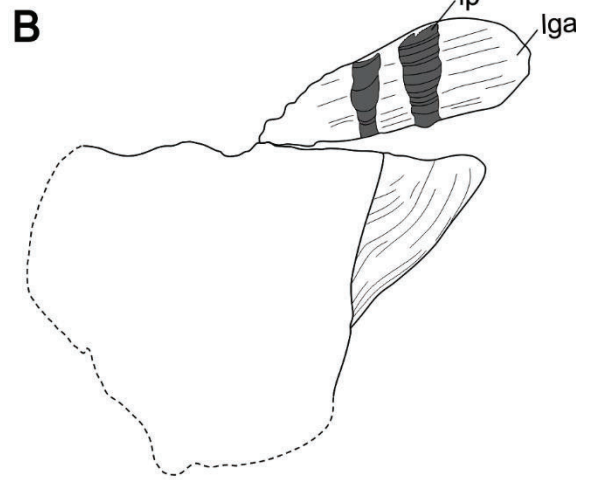
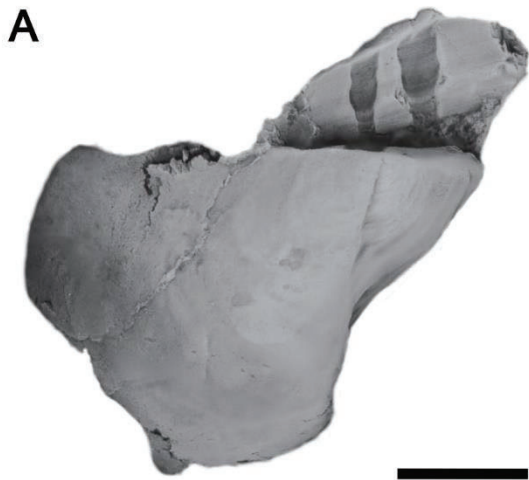


Fig. 8. *Aguileria romualdoensis* sp. nov., Romualdo Formation (Aptian), general morphology and muscle scars. A. Plasticine cast of articulated valves, DZP-20709 [holotype]. C, E, G. Internal molds of right valves, lateral view, DZP-20523II [paratype], DZP-20702II, and DZP-20699, respectively. B, D, F, H. Sketches of the same specimens. Abbreviations: lga – ligament area, lp – ligament pit, pams – posterior adductor muscle scar, prms – posterior pedo-byssal retractor muscle scar. Scale: 5 mm.

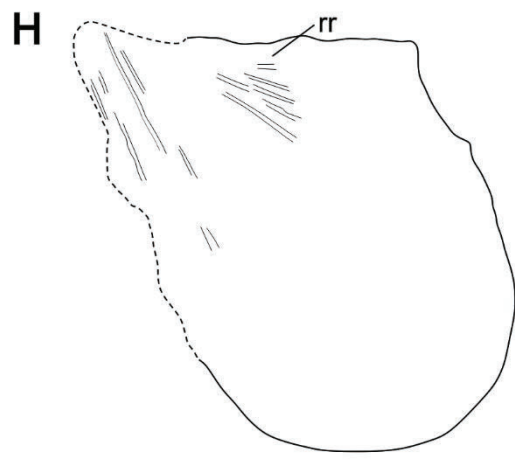
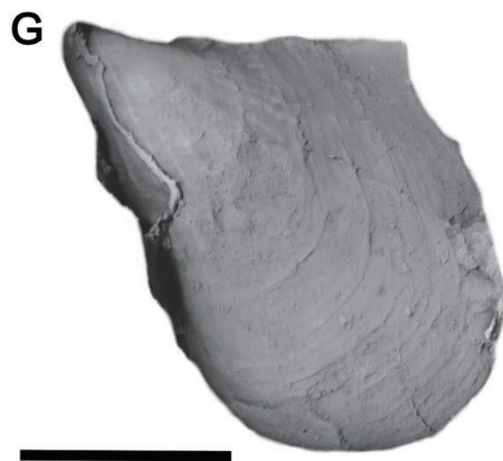
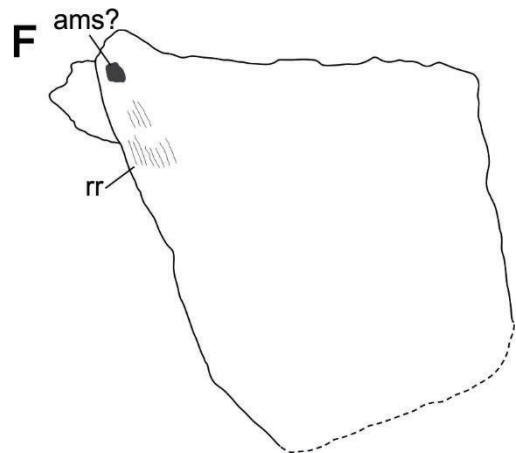
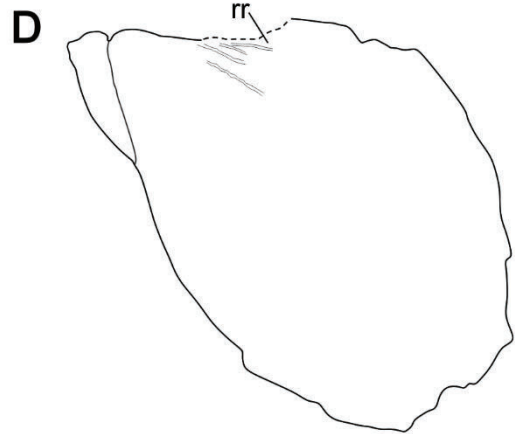
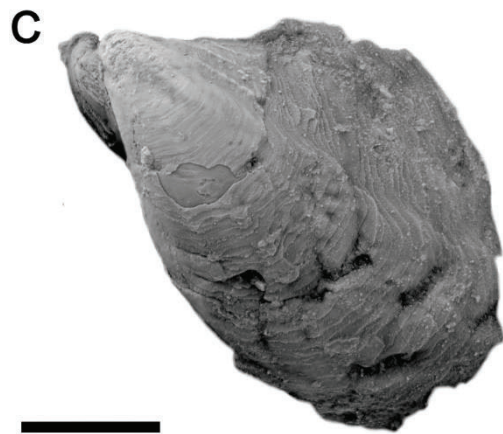
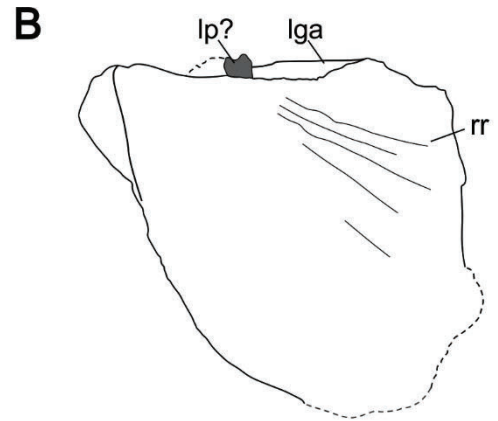
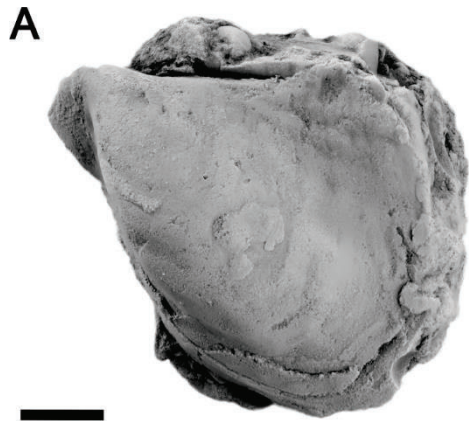


Fig. 9. Gen. et sp. indet., Romualdo Formation (Aptian), general morphology and muscle scars. A, E. Internal molds of left valves, DZP-20008 and DZP-20483, respectively. C. Left valve with preserved shell, DZP-20564. G. Latex cast of left valve, DZP-20126I. B, D, F, H. Sketches of the same specimens, note that only few muscle scars are visible. Abbreviations: ams – accessory muscle scar, lga – ligament area, lp – ligament pit, rr – radial ribs. Scale: 5 mm.

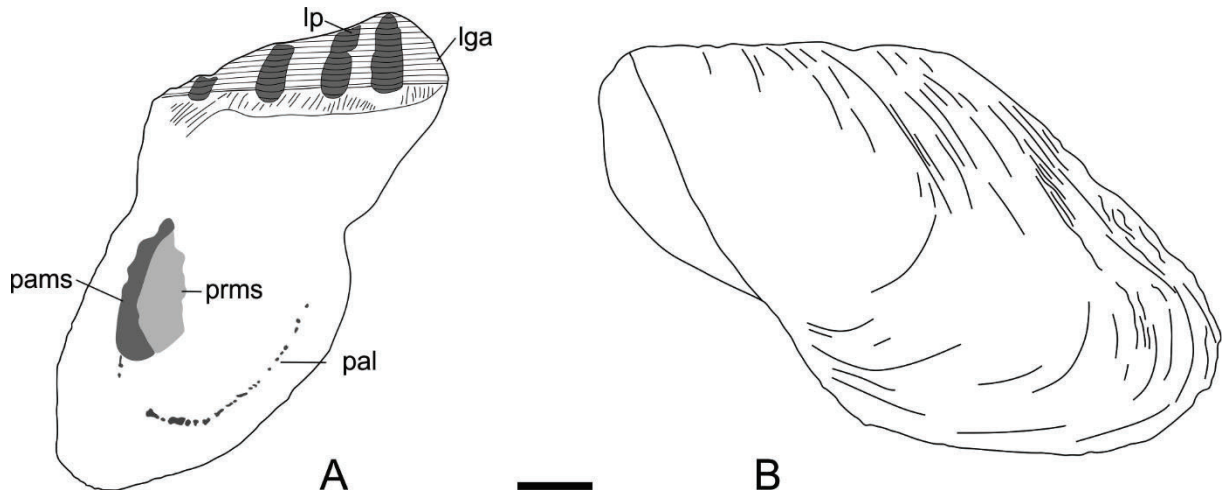


Fig. 10. Drawings of the shells of *Aguilera renauxiana* (Stephenson, 1952) from the Cenomanian Woodbine Formation, East Texas Basin, Texas (US). A. Left valve showing the internal shell characters. B. Same specimen, lateral view, displaying the external shell morphology and ornamentation. Sketches based on Stephenson (1952, pl. 16). Abbreviations: lga – ligament area, lp – ligament pit, pal – pallial line, pams – posterior adductor muscle scar, prms – posterior pedo-byssal retractor muscle scar. Scale: 5 mm.

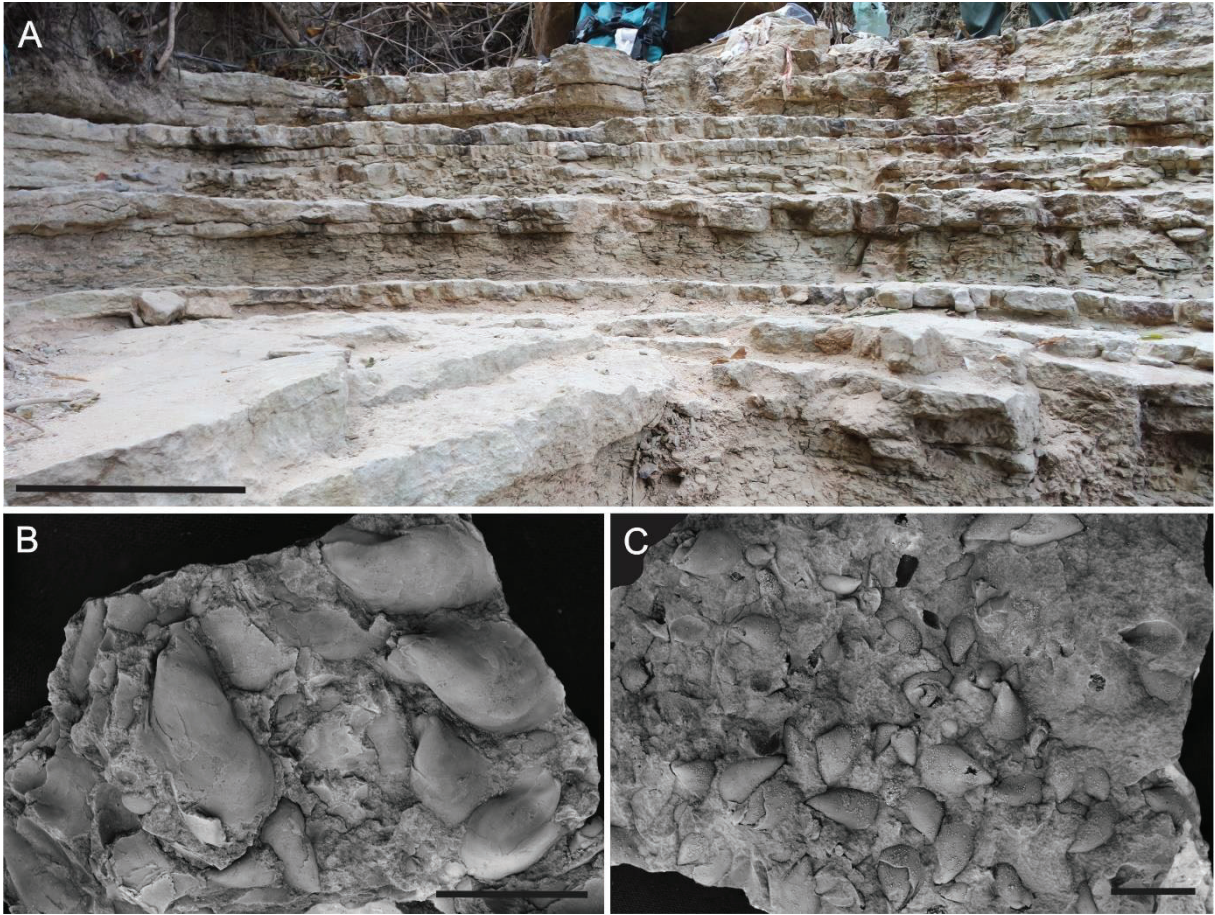


Fig. 11. Bakevelliid-bearing limestones of the upper part of the Romualdo Formation, Aptian, Araripe Basin, from various localities. A. Carbonate-rich interval with several cm-thick bakevelliid-dominated limestones, Sobradinho section, Jardim, Ceará. Scale bar is 50 cm. B. Plan-view of the uppermost carbonate bed, showing disarticulated bakevelliid valves, same stratigraphic interval and locality as in A. Scale bar is 2 cm. C. Plan-view of a bakevelliid-rich shell pavement, showing chaotically oriented disarticulated valves, Serra do Inácio section, Araripina, Pernambuco. Scale bar is 2 cm.

Table 1. Historical review of the bakevelliid occurrences in the interior basins of northeastern Brazil. Fm. – Formation; Mb. – Member.

Basin	Geologic Unit	Locality/Coordinates (UTM)	Authors	Taxa
Araripe	Romualdo Fm.	Lagoa de Dentro-Rancharia, Araripina city, Pernambuco State	Beurlen (1963); Beurlen (1971), mentions	<i>Aguileria</i> sp.
		—	Mabesoone and Tinoco (1973), mention	<i>Aguileria</i> sp.
		Lagoa de Dentro, Araripina city, Pernambuco State	Sales (2005), mention	<i>Aguileria</i> sp.
		Sobradinho, Bom Jardim city, Ceará State - 24M UTM 9163112N/481859E	Bruno and Sial (2009), mention; Bruno (2009) formal description (unpublished)	<i>Pseudoptera beurleni</i> sp. n.
		Fazenda dos Izaques and Sítio Torrinha, Araripina city, Pernambuco State	Pereira et al., (2015), formal description	<i>Aguileria dissita</i>
		Ladeira do Belenga, Simões city, Piauí State; Canastra, Torre Grande, Torrinha and Lagoa de Dentro, Araripina city; Santo Antônio and Cedro, Exu city, Pernambuco State	Pereira et al., (2017), mention	<i>Aguileira dissita</i>
		Sobradinho, ~20 km of the Jardim city, Ceará State - 24M UTM 9163112N/481911E	Fürsich et al., (2019), mention	<i>Bakevellia</i> sp.
Pernambuco-Paraíba	Beberibe Mb., Itamaracá Fm.	Beberibe River valley, west of Recife city, Pernambuco State	Kegel (1957) - mention, Guimarães (1964), mention	<i>Gervillia</i> sp.

Sergipe- Alagoas		Porto dos Barcos, Trapiche das Pedras Velho and Coqueiro, Sergipe State	White (1887a), mention	<i>Gervillia dissita</i> sp. n.
	Riachuelo Fm.	Pasto da Carregoza, between Riachuelo and Tanque cities, Sergipe State	Maury (1936), formal description	<i>Gervilleia dissita</i> White, 1887a; <i>Gervilleia regoi</i> sp. n.
		Coqueiro 1, 24L UTM 8815129N/698953E and Taquari 1, 24L UTM 8823752N/716027E	Mello et al. (2007), formal description	<i>Gervillia sergipensis</i> sp. n.
		—	Hessel and Filizola Jr. (1989), formal description (unpublished)	<i>Aguileria</i> sp. White, 1887a
	Angico Mb., Riachuelo Fm.	—	Hessel (2004), formal description	<i>Gervillia (Gervillia) solenoidea</i> Defrance, 1820

Table 2. Measurements (in mm) of the valves of *Araripevellia musculosa* gen. et sp. nov., Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. Explanation: D, length of central body; H, height; L, length; Laur, auricle length; Lwing, wing length; O, obliquity; Pits, number of preserved ligament pits; W, width of the two valves and Wlig, ligament width.

Specimen	Locality	L	H	W	D	Laur	Lwing	O	Wlig	Pits
DZP-19973II	Sobradinho	—	—	—	—	—	—	—	1.3	2
DZP-19978I	Sobradinho	—	16.5	—	—	—	—	—	1.5	2
DZP-19988II	Sobradinho	19.5	—	—	20.9	4.1	—	45.4°	—	—
DZP-20002	Sobradinho	—	13.6	10	20.6	—	12	40.1°	—	—
DZP-20004	Sobradinho	21.1	20.1	8.2	22.7	2.5	—	47°	—	—
DZP-20006	Sobradinho	16.5	14	—	16.2	4.4	11	—	—	—
DZP-20460I	Sobradinho	23.7	19.7	12.8	24	4	—	48°	—	—
DZP-20462	Sobradinho	22.5	21.2	9	25.5	4	10	—	—	—
DZP-20463	Sobradinho	21.2	17.6	10.7	—	5	10.4	—	—	—
DZP-20464	Sobradinho	25	18.5	—	24.9	5.4	15.2	39.3°	—	—
DZP-20478I	Sobradinho	23.6	20	—	27.3	5.6	—	45.4°	1.8	3
DZP-20478II	Sobradinho	20.9	—	—	24.6	4.9	11.8	44.4°	2	3
DZP-20508	Sobradinho	17	17	7.6	19.6	2.5	10.7	49.9°	—	—
DZP-20520I	Sobradinho	25	—	—	25.4	5.4	—	36.3°	1.5	4
DZP-20521BII	Sobradinho	18.7	15.9	8	19.8	2.5	8.2	45.2°	—	—
DZP-20557I	Serra do Inácio	14	13.2	—	—	2.4	7.5	47°	—	—
DZP-20566II	Serra do Inácio	11.5	—	—	12.8	1.6	—	51°	—	—
DZP-20571II	Serra do Inácio	11.5	11.2	—	13.3	2.5	7.3	53.7°	—	—
DZP-20576	Serra do Inácio	18	16.9	—	21.3	3.7	12.7	48.2°	—	—
DZP-20584II	Serra do Inácio	15	13.3	—	16.8	2.6	—	49.9°	1.4	2
DZP-20610I	Sobradinho	—	—	—	—	—	10.2	—	1.7	3
DZP-20623AI	Serra do Inácio	10.4	9.2	—	11.3	1.8	5.7	47.5°	—	—
DZP-20623AIII	Serra do Inácio	7.3	8	—	9.3	1.3	6.7	43°	—	—
DZP-20623AIV	Serra do Inácio	9.1	7.8	—	9.4	1.8	6.1	—	—	—
DZP-20625I	Sobradinho	21.3	18.6	—	25.5	—	14.3	42.9°	1.6	3
DZP-20646	Sobradinho	22.5	16.6	9.6	24	—	12	39.4°	—	—

DZP-20647	Sobradinho	22	19	11.9	25.2	—	—	45°	—	—
DZP-20649	Sobradinho	19.5	14.3	7.5	15.5	2.6	10	49.7°	—	—
DZP-20654	Sobradinho	16.3	13	7.5	17.7	7.8	4.6	47.8°	—	—
DZP-20655	Sobradinho	19	13.6	10.6	20	3	—	—	—	—
DZP-20659	Sobradinho	18.5	13	7.5	19.5	3.3	9	35.7°	—	—
DZP-20707	Sobradinho	—	—	—	—	2.6	11.7	—	—	3
DZP-20716	Sobradinho	17	15.5	7.3	19	4	8.6	40.2°	—	—
DZP-20720	Sobradinho	19.7	18	8.5	—	3.3	9	—	—	3

Table 3. Measurements (in mm) of the valves of *Aguileria romualdoensis* sp. nov., Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. Explanation: D, length of central body; H, height; L, length; Laur, auricle length; Lwing, wing length; O, obliquity; Pits, number of preserved ligament pits and Wlig, ligament width.

Specimen	Locality	L	H	D	O	Laur	Lwing	Wlig	Pits
DZP-19989I	Sobradinho	19.3	18.3	—	—	4.8	11.9	—	—
DZP-19989IX	Sobradinho	11.6	9.3	13	42.8°	2.4	7.7	—	—
DZP-20126III	Sobradinho	—	—	—	—	5.6	—	—	—
DZP-20126VII	Sobradinho	—	—	—	—	3.1	—	—	—
DZP-20523II	Sobradinho	—	21.1	—	—	3.5	—	—	—
DZP-20536	Sobradinho	18.4	—	21.4	43.4°	2.4	—	—	—
DZP-20695A	Serra do Inácio	18.3	—	21.1	47.4°	3	—	—	—
DZP-20699	Serra do Inácio	16	—	17.8	36.5°	2.8	—	—	—
DZP-20702II	Serra do Inácio	10.2	11.4	12.7	48.9°	2.5	7.3	—	—
DZP-20709	Sobradinho	—	—	—	—	5	—	5.2	2

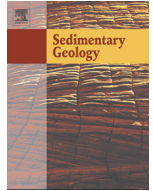
Table 4. Measurements (in mm) of the valves of gen. et sp. indet., Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. Explanation: D, length of central body; H, height; L, length; Laur, auricle length; Lwing, wing length; O, obliquity; and Pits, number of preserved ligament pits.

Specimen	Locality	L	H	D	O	Laur	Lwing	Pits
DZP-20008	Sobradinho	22.7	21	26.7	48.4°	3.5	18.5	1
DZP-20126I	Sobradinho	—	—	—	—	—	7.4	—
DZP-20483	Sobradinho	14.7	15	—	—	—	13.3	—
DZP-20562I	Serra do Inácio	—	—	19.9	50.3°	3	—	—
DZP-20564	Serra do Inácio	15.8	14.2	18.1	46.2°	2.3	11.3	—
DZP-20622BI	Serra do Inácio	—	—	—	—	—	9	—
DZP-20691I	Serra do Inácio	12.7	—	13.2	47.4°	2	—	—

ANEXO

Microbialite fields developed in a protected rocky coastline: The shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil).

Este anexo é um artigo em co-autoria com F.G. Varejão, F. T. Fürsich, L. V. Warren, S.A. Matos, M.L. Assine, A.M.F. Sales, M.G. Simões. O artigo encontra-se publicado no periódico *Sedimentary Geology*, 389: 103-120. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.06.003>



Microbialite fields developed in a protected rocky coastline: The shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil)

F.G. Varejão^{a,*}, F.T. Fürsich^b, L.V. Warren^a, S.A. Matos^c, M.G. Rodrigues^{a,c}, M.L. Assine^a, A.M.F. Sales^{d,1}, M.G. Simões^c

^a Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Avenida 24A, 1515, Rio Claro 12506-900, Brazil

^b GeoZentrum Nordbayern, FG Paläoumwelt, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstr 28, 91054 Erlangen, Germany

^c Departamento de Zoologia, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Distrito de Rubião Júnior, Botucatu 18618-000, Brazil

^d Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Regional do Cariri, Campus Pimenta 1161, Crato 63.100-000, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 May 2019

Received in revised form 6 June 2019

Accepted 7 June 2019

Available online 14 June 2019

Editor: B. Jones

Keywords:

Stromatolites

Microbialites

Echinoids

Bivalves

Shark Bay analogue

Lower Cretaceous

ABSTRACT

The Aptian Romualdo Formation is a siliciclastic-dominated sedimentary unit recording the last marine incursion within the Cretaceous interior basins of northeastern Brazil. At the western margin of the Araripe Basin, rocks of the Romualdo Formation are mainly represented by carbonates resting abruptly over the Proterozoic crystalline basement. Detailed mapping and stratigraphic analysis revealed two stromatolite fields that were described and discussed for the first time. Several bioherms, biostromes and isolated stromatolites characterized by distinct microbialite morphologies associated with echinoid-rich strata have been identified, suggesting that hypersalinity, water depth and hydraulic conditions were the main factors controlling stromatolite morphogenesis. A cm-thick amalgamated bivalve rudstone, resting directly on the basement and representing a shell concentration formed above the fair-weather wave base was also recorded. Based on the regional distribution of the stromatolite types and associated sedimentary facies, we interpret the depositional environment as a local low-gradient carbonate ramp deepening to the east. Our data robustly indicated that the western rocky shorelines of the Araripe Basin during the Aptian were populated by microbial mats and stromatolites in a condition analogous to the modern world-famous Hamelin Pool, Shark Bay, Western Australia. Finally, the development of stromatolites and echinoid-bearing microbialites at the western margin of the basin may be correlated with the formation of bivalve-rich and cassioid-rich shell beds in the upper part of the Romualdo Formation at the eastern margin.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Compared to the Precambrian geological record, microbialites were rare in the Phanerozoic with present-day occurrences found mainly in particular aquatic settings, such as the hypersaline embayment of Shark Bay, Australia (Riding, 2000) and the marine Exuma Cays, Bahamas (Reid et al., 2011). The rise of the metazoans is thought to have played a critical role in restricting the distribution of microbialites by imposing a competition pressure – although an inverse microbialite vs. metazoan presence/absence is not always observed (see discussion

in Riding, 2006). Indeed, metazoan skeletal remains are found associated with stromatolites in many modern locations worldwide, such as in the Lizard Island, Great Barrier Reef (Reitner, 1993), Shark Bay, Australia (Jahnert and Collins, 2011), and Lagoa Salgada, Brazil (Ricardi-Branco et al., 2018).

Microbialites grow in response to the close association between sedimentation and lithification (Reid et al., 2000) binding sediment and/or directly precipitating calcium carbonate (Reid et al., 2003; Dupraz et al., 2009). They are complex geo-biosphere systems that potentially record morphological changes that may unlock several physical environmental parameters (Andres and Reid, 2006; Dupraz et al., 2006). In this way, microbialites are fine tools to use in the reconstruction of depositional environments (Buongiorno et al., 2019).

Epeiric seas are generally the result of a rising relative sea level with consequent formation of thin transgressive deposits during overall landward migration of the shoreline/coastal onlap (Merletti et al., 2018). Carbonate ramps may develop in these settings, constituting

* Corresponding author.

E-mail addresses: filipe.varejao@hotmail.com (F.G. Varejão), franz.fuersich@fau.de (F.T. Fürsich), lucas.warren@unesp.br (L.V. Warren), sumatos.s@gmail.com (S.A. Matos), marizagomesrodrigues@gmail.com (M.G. Rodrigues), mario.assine@unesp.br (M.L. Assine), profingsimoes@gmail.com (M.G. Simões).

¹ In memoriam.

excellent sites for the preservation of microbialites (Lokier et al., 2018). When sea level starts to fall, the formation of restricted embayments is favored, which are potential areas for stromatolite growth due to the increasing likelihood of elevated salinity conditions (Jahnert and Collins, 2013). However, recognizing such structures in ancient deposits is not common, as the thin microbial deposits generated over basement rocks were exposed and removed by erosion.

Here we record, for the first time, well-preserved isolated stromatolites, biostromes, bioherms and associated carbonate facies from the Lower Cretaceous Romualdo Formation at the western margin of the Araripe Basin, NE Brazil. The microbialites directly rest on Precambrian basement rocks, indicating that littoral areas were populated by microbialites at that time. Surprisingly, echinoid tests are also associated with the microbialites suggesting their close relationship. The carbonate facies, including microbialites and bioclastic deposits, resembled the conditions existing in the present-day Hamelin Pool, Shark Bay, Australia. There, microbial facies coexist with shallow coastal deposits constituting an excellent model for analogous deposits in the geological record.

In this context, the main goals of this contribution are: (a) categorize the microbialites based on their macro-, meso- and micro-structures; (b) record the lateral and vertical distribution of the stromatolites in order to understand their paleoenvironmental distribution; (c) discuss the factors controlling the formation of these microbially induced structures and their relationships with other paleoenvironmental parameters, and (d) correlate the stromatolite-bearing carbonate interval with other carbonate units of the Romualdo Formation at the eastern margin of the Araripe Basin.

2. Background: the stromatolites of the Santana Group

The occurrence of microbialites in rocks of the Early Cretaceous Santana Group were already recorded in the Barbalha, Crato, Ipubi and Romualdo formations of the Santana Group (Assine et al., 2014; Neumann and Assine, 2015), although detailed description, classification based on modern protocols, and their illustration are still lacking in many cases.

Cavalcanti and Viana (1990), and Martill and Wilby (1993) were the first to describe these structures in the Cretaceous succession of the Araripe Basin. Later, Srivastava (1996) recorded diverse forms of stromatolites in the Crato, Ipubi, and Romualdo formations. In the Crato Formation, Srivastava (1996) recorded the presence of stratiform and pseudo-domal stromatolites that were interpreted as generated at the bottom of shallow, quiet and protected water bodies. In the Ipubi Formation, Srivastava (1996) recorded stratiform, domal and columnar stromatolites in micritic limestones and marls, which occur interbedded with gypsum and anhydrite (cf. Cavalcanti and Viana, 1990). Stratiform, domal and columnar stromatolites were also mentioned from the Romualdo Formation cropping out at the western margin of the Araripe Basin, resting directly on the basement (Srivastava, 1996).

Microbialites from the Santana Group were studied by Sales (2005), that recorded well-laminated, echinoid-bearing carbonates from the Romualdo Formation in the vicinities of the Araripe Town, Pernambuco State. These carbonates were interpreted as microbial mats that grew in shallow and calm waters.

Based on a detailed microfacies analysis, Catto et al. (2016) suggested that the limestone morphogenesis of the Crato Formation involved strong and pervasive microbial activity. Calcified coccooid and filaments were identified as well as abundant calcified biofilms composed of Extracellular Polymeric Substances (EPS) within the laminites. Therefore, contrary to previous studies (e.g., Heimhofer et al., 2010), we concluded that microbes considerably influenced the formation of the laminated limestones.

In a subsequent study, Warren et al. (2017) described in detail the stromatolites and associated carbonate sedimentary facies of the Crato Formation from the succession analyzed by Catto et al. (2016).

According to these authors, at least three stromatolite-bearing levels occur at the lower part of the Crato Formation and are intercalated between the apparently monotonous succession of laminated carbonates. In the lower level (Level 1), stromatolites occurred discontinuously as 30-cm-tall domal stromatolites (Warren et al., 2017). Each structure produced a symmetric high convexity with internal undulating lamination with a lenticular shape. Centimeter-sized elliptical oncoids occur trapped in laminae between domes. The intermediate stromatolite-bearing level (Level 2) was emplaced approximately 1.5 m above Level 1, consisting of low discontinuous biostromes. The domes are slightly asymmetric and locally coalescing. The upper microbialite-bearing level (Level 3), occurred 2.2 m above Level 2 and is characterized by a discontinuous layer with isolated, domal stromatolites. According to Warren et al. (2017), during the Aptian, microbial mats thrived in shallow-water, hypersaline settings at the margins of the Araripe lacustrine system and were responsible for the formation of stromatolites in the Crato Formation. The record of these microbialites, together with recent findings of *in situ* coccooid, filamentous and spiral cyanobacteria cells and preserved EPS in the laminites of the Crato Formation (Catto et al., 2016), suggests well-laminated limestones genesis strongly influenced by microbial activity (Warren et al., 2017).

Fabin et al. (2018) mentioned wavy laminations in laminated limestones at the top of the Crato Formation that may represent microbial structures recognized near the Town of Nova, Ceará State. Similar microbial laminites with preserved coccooid cells were briefly described from the Batateira Bed of the Barbalha Formation (Dias-Brito et al., 2015).

The study of the microbialites and associated carbonate sedimentary facies of the Santana Group is still in its initial stage, and the Romualdo Formation provides an important site for advances in the stratigraphic and paleontological knowledge of the world-famous Lower Cretaceous unit.

3. Geological context

The Araripe Basin is an intracratonic Cretaceous rift basin that originated in response to the tectonic stresses of the Gondwana break-up and the opening of the South Atlantic Ocean (Matos, 1992; Valença et al., 2003; Assine, 2007). During its post-rift stage I, rocks of the Santana Group, encompassing in stratigraphic ascending order the Barbalha, Crato, Ipubi, and Romualdo formations, were deposited (Assine et al., 2014; Neumann and Assine, 2015). The Romualdo Formation can reach 100-m-thick of siliciclastic-dominated sediments (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019) that strongly decreases in thickness to the western margin of the basin (Figs. 1 and 2).

At the eastern margin, the Romualdo Formation is a marine-influenced unit corresponding to a depositional sequence encompassing two transgressive-regressive (TR) cycles (Fürsich et al., 2019). The first TR cycle includes the concretion-bearing black shales that are world-wide renowned for the exceptional preservation of the Santana fossils (vertebrates with soft tissue preservation, mostly fishes) (e.g., Maisey, 1991; Fara et al., 2005; Martill et al., 2007). This fauna differs drastically from that preserved at the second TR cycle, which comprises a few-meters-thick (<5 m) mixed carbonate-siliciclastic succession containing several bivalve- and gastropod-dominated shell concentrations mainly deposited under high-energy conditions (Fürsich et al., 2019). Parts of the carbonates correspond to one of the main phases of marine influence in the basin, a time with near-normal marine salinity conditions where echinoids and bivalves thrived (see also Beurlen, 1966 and Martill, 2007).

The reduced thickness of the Romualdo Formation in the western part of the basin is composed by a sedimentary package distinct from its eastern counterpart (Custódio et al., 2017, Fig. 2). The scattered and discontinuous occurrences in the western margin are mainly represented by incomplete successions of concretion-bearing shales and

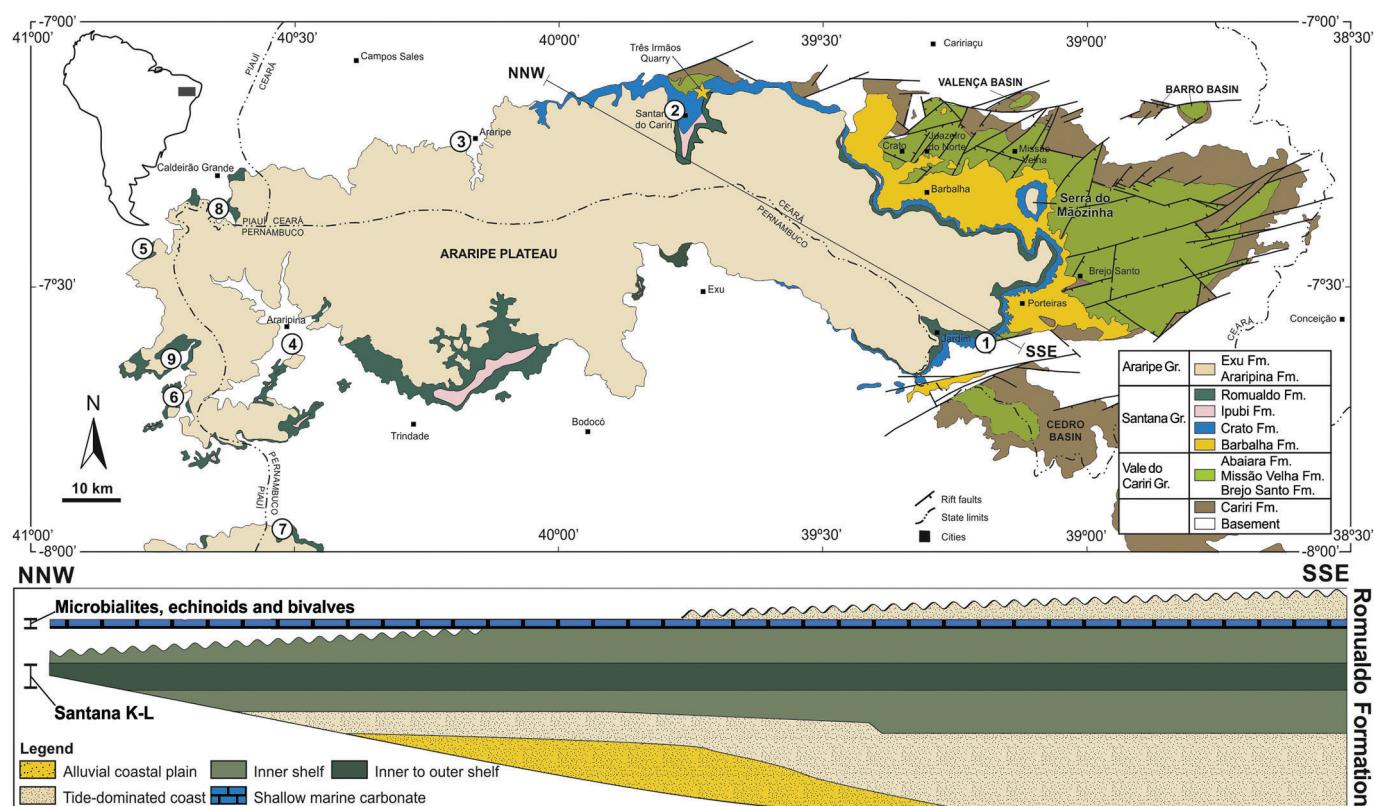


Fig. 1. Geologic map of the Araripe Basin and idealized diagram showing the depositional sequence of the Romualdo Formation (modified from Custódio et al., 2017). Columnar sections studied in detail: 1-Sobradinho; 2-Estiva; 3-Hospital; 4-Sítio Canastra; 5-Alagoinha; 6-Curralinho; 7-Inácio; 8-Caldeirão Grande; 9 - Sítio Alecrim. Santana K-L – Santana Konservat-Lagerstätte; Fm. – Formation; Gr. – Group.

shell-rich limestones. Within the shell beds, the molluscan fauna is predominantly composed of gastropods (cassiopids, cerithiids and naticids) and bivalves (bakevelliids, mytilids and corbulids) (Pereira et al., 2015, 2016, 2017). In addition, macroinvertebrate concentrations and articulated echinoids have also been recorded (Beurlen, 1966; Sales, 2005; Prado et al., 2015; Pereira et al., 2017). Some of these echinoids occur within lithified microbial mats associated with bivalves and gastropods near Araripina Town, Pernambuco State (Sales, 2005).

4. Material and methods

The field program in the Araripe Basin was conducted during the period of 2013 to 2019. These results were combined with previously (2001–2005) data acquired by others researchers. All the new data gathered come from the western margin of the Araripe Basin, where upper strata of the Romualdo Formation unconformably rest over Proterozoic basement rocks. In this area, a total of seven columnar sections (i.e., Serra do Inácio, Curralinho, Sítio Alecrim, Alagoinha, Sítio Canastra, Caldeirão Grande and Hospital, see Fig. 1 for location) were measured and their facies described in detail.

Several samples of stromatolites, echinoid-bearing microbialites and bivalve shell beds produced slabs for macroscopic examination and laboratory classification. Additionally, 17 petrographic thin-sections were examined under both normal and polarized light using a Zeiss Axio Imager A.2 binocular petrographic microscope and a Zeiss Stereo Discovery V.11 binocular magnifying glass, at the Center for Geosciences Applied to Petroleum Geology, São Paulo State University (UNESPetro-UNESP). The micro and ultrastructural images were acquired with the SEM X-ray energy-dispersive spectrometer JEOL JXA 8230 equipped with 5 WDS spectrometers and a solid-state EDS detector, at the Department of Petrology at São Paulo State University (UNESP), Brazil. The resulting images were generated in high-pressure mode, using

secondary electron images operated at EHT 15 kV, working distance of 10 mm and spot size of 40, without metal coating.

For the facies classification of microbialites Fairchild and Sanchez (2015) protocol was applied, based on data of Hofmann (1969), Preiss (1972), Walter (1972), and Grey (1989), which categorized microbialites on the basis of macro-, meso-, and micro-scale structures. Classification of the bivalve-bearing rock was based on biofabric and taphonomic arrangement of shells, from which the degree of hydraulic reworking and transport of biogenic particles was inferred (Fürsich and Oschmann, 1993). The terms allochthonous and parautochthonous are used in the sense of Kidwell et al. (1986).

5. Sedimentary facies

At the western margin, the Romualdo Formation is almost exclusively calcareous with scattered basement pebbles, resting directly on Proterozoic basement rocks. The contemporaneity of these carbonates with rocks from the depositional succession in the eastern side is based in biostratigraphic correlations and basin architecture indicating that at least, part of the sediments is time-equivalent (Figs. 1 and 2A). In the upper 40-m-thick the Serra do Inácio section (Fig. 1), from the Romualdo Formation reveals a well-developed sequence with transgressive-regressive cycles.

Detailed columnar sections were measured in the western part of the Araripe Basin. Stromatolites were documented in the Curralinho and Alagoinha sections (Sections 6 and 5), while echinoid-bearing microbial laminites and bivalve rudstones were registered in the Sítio Canastra and Hospital sections, respectively (Sections 4 and 3, Fig. 2B). Fig. 3 summarizes all the carbonate sedimentary facies that are directly associated with microbialites described and interpreted in the following section.

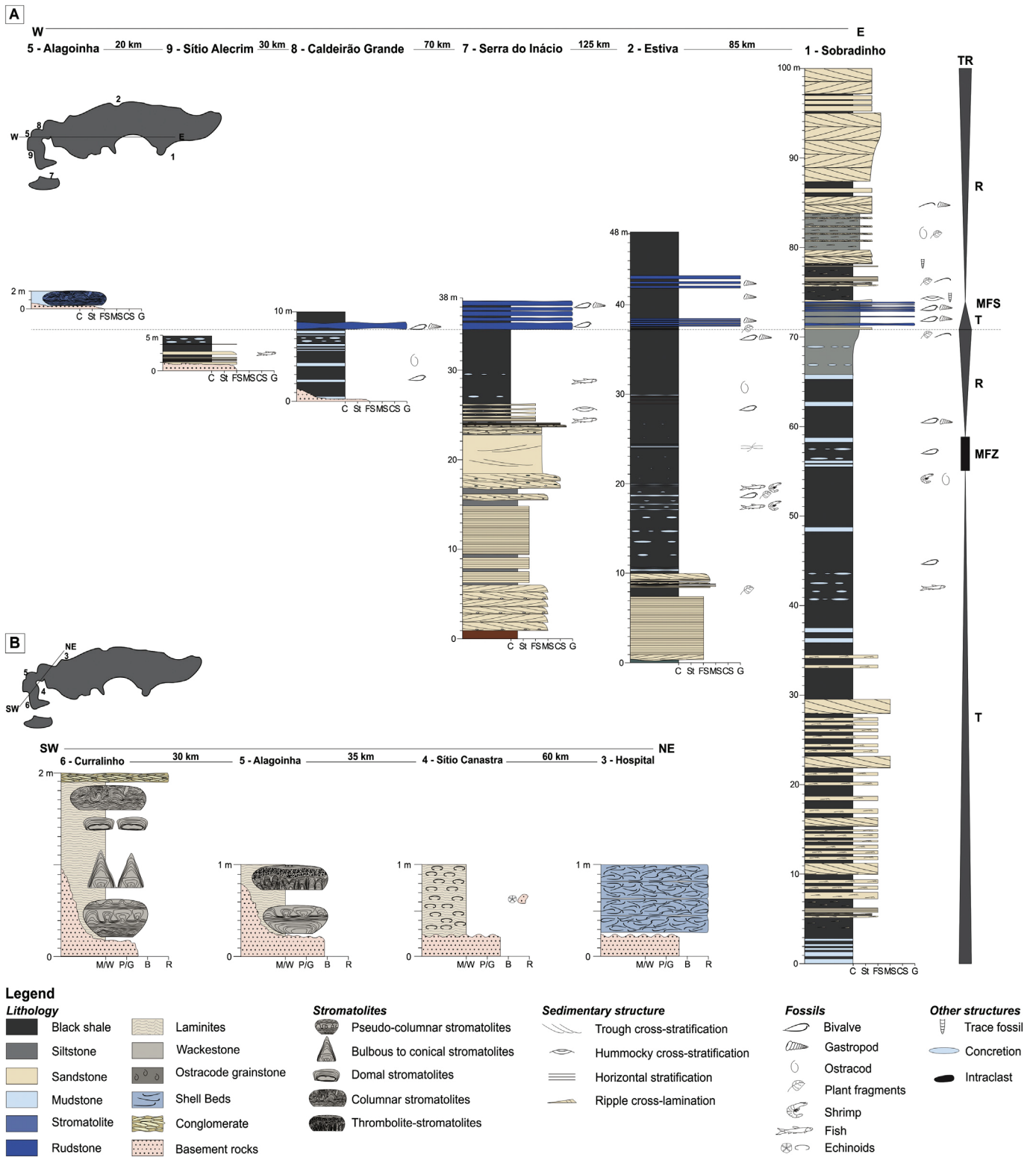


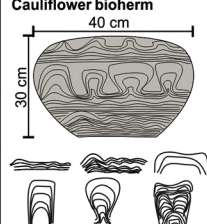
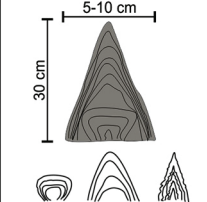
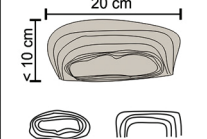
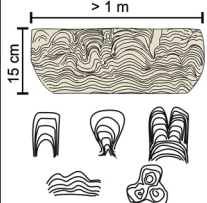
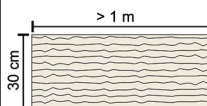
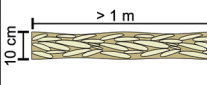
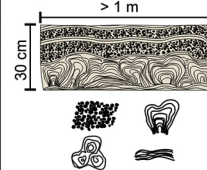
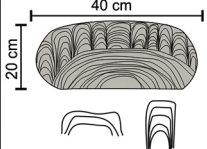
Fig. 2. Columnar sections of the Romualdo Formation. A: Transect (E-W) of measured columnar sections showing thicker preserved strata in the eastern part and a thin carbonate-dominated succession in the western part of the Araripe Basin. C – clay; St – silt, FS – fine sandstone; FM – medium sandstone; CS – coarse sandstone; G – granule; TR – Transgressive-Regressive cycles; T – Transgressive; R – Regressive; MFZ – Maximum Flooding Zone; MFS – Maximum Flooding Surface. B: Transect (NW-SE) of the studied sites, highlighting the occurrence of stromatolites, echinoid-bearing microbial laminites and bivalve rudstones. M/W – mudstone/wackestone; P/G – packstone/grainstone; B – boundstones; R – rudstone.

5.1. Cauliflower bioherms

5.1.1. Description

Isolated bioherms are found in a N-S oriented stromatolite field of about 3600 m² at the Curralinho site, directly overlying the basement

rocks. Bioherms are approximately 30 cm high and 40 cm wide exhibiting a typical cauliflower shape (Fig. 4A) and forming isolated reefs. These bioherms consist of at least two cycles of smooth microbial laminites passing into pseudo-columnar and columnar stromatolites. The columnar stromatolites present three main

Morphology	Macrostructures	Mesostructures	Microstructures
<p>Cauliflower bioherm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Columnar-laminated microbial complex - Transverse outline: Intergrown irregular bodies - Growth vector: Straight to sinuous - Proximity of structures: Adjoined - Frequency of branching: Abundant - Dichotomy: Parallel to divergent - Connection between structures: Bridges - Column width: Wrinkled 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Moderately convex / Parabolic / Rectangular - Lamina curvature: Curved to wrinkled - Regularity of laminar stacking: Little to moderately laminated - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with partial to extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Wrinkled - Continuity: Continuous do disrupted and brecciated - Relative thickness: Coarse (~0.5 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure - Components: Peloids, nodules, coccoid cells, and possibly ooids - Other components: - - Preservation: Silicified
<p>Conic stromatolite</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Bulbous to conoid dome - Transverse outline: Round elliptical bodies - Growth vector: Straight to curved - Proximity of structures: Close to spaced - Frequency of branching: Absent - Dichotomy: Absent - Connection between structures: Bridges - Column width: Wrinkled 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Coniform with axis / Coniform without axis / Overarching - Lamina curvature: Wrinkled - Regularity of laminar stacking: Moderate to high axial zones - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Medium (~0.2 mm) - Composition: Sparite with microclotted structure - Components: Peloids, coccoid cells, ostracodes - Other components: Pyrite - Preservation: Silicified
<p>Domal stromatolite</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Normal dome / Oncoid - Transverse outline: Round oblong bodies - Growth vector: Straight - Proximity of structures: Isolated - Frequency of branching: Absent - Dichotomy: Absent - Connection between structures: - - Column width: - 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Coated / Retangular - Lamina curvature: Curved - Regularity of laminar stacking: Symmetric - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Fine to medium (~0.1-0.2 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure - Components: Peloids, coccoid cells - Other components: - - Preservation: Silicified
<p>Columnar bioherm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Anastomosed microbial complex - Transverse outline: Intergrown oblong bodies - Growth vector: Straight to sinuous - Proximity of structures: Adjoined - Frequency of branching: Common - Dichotomy: Parallel - Connection between structures: Coalescent to bridged - Column width: Uniform 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Highly convex to rectangular - Lamina curvature: Curved - Regularity of laminar stacking: Symmetric to asymmetric - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with partial to extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Fine to medium (~0.1-0.2 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure and organic laminae - Components: Ostracodes, organic matter - Other components: Pyrite and accessory minerals - Preservation: -
<p>Smooth laminite</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Laterally continuous (planar laminated) - Transverse outline: - - Growth vector: - - Proximity of structures: Lateral linked - Frequency of branching: - - Dichotomy: - - Connection between structures: Coalescent - Column width: - 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Plane - Lamina curvature: Without - Regularity of laminar stacking: - - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Without inflection 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Medium to coarse (~0.2-0.5 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure and sparite with clotted structure - Components: Peloids, fish fragments, ostracodes - Other components: Pyrite and accessory minerals - Preservation: -
<p>Intraformational conglomerate</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: - - Transverse outline: - - Growth vector: - - Proximity of structures: - - Frequency of branching: - - Dichotomy: - - Connection between structures: - - Column width: - 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: - - Lamina curvature: - - Regularity of laminar stacking: - - Micro- unconformities: - - Lamina behaviour: - 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: - - Continuity: - - Relative thickness: - - Composition: Micritic clasts and micritic matrix - Components: Coccoid cells - Other components: - - Preservation: -
<p>Stromatolite-thrombolite bioherm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Columnar-laminated microbial complex - Transverse outline: Intergrown oblong bodies - Growth vector: Curved to sinuous - Proximity of structures: Adjoined - Frequency of branching: Common - Dichotomy: Parallel to divergent - Connection between structures: Coalescent to bridged - Column width: Uniform 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Moderately convex / Parabolic - Lamina curvature: Curved to wrinkled - Regularity of laminar stacking: Symmetric to asymmetric - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with partial to extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Fine to medium (~0.1-0.2 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure and organic laminae - Components: Ostracodes, organic matter - Other components: Pyrite and accessory minerals - Preservation: -
<p>Domal-columnar bioherm</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Body morphology: Anastomosed microbial complex - Transverse outline: Intergrown round to oblong bodies - Growth vector: Straight - Proximity between structures: Adjoined - Frequency of branching: Absent to rare - Dichotomy: - - Connection between structures: Coalescent - Column width: Uniform 	<ul style="list-style-type: none"> - Growth surface: Moderately convex / Rectangular - Lamina curvature: Curved - Regularity of laminar stacking: Symmetric - Micro- unconformities: Present - Lamina behaviour: Lamina inflection with partial to extensive recovering 	<ul style="list-style-type: none"> - Lamination: Smooth - Continuity: Continuous - Relative thickness: Fine to medium (~0.1-0.2 mm) - Composition: Micrite with microclotted structure and organic laminae - Components: Ostracodes, organic matter - Other components: Pyrite and accessory minerals - Preservation: -

morphologies: cylindrical, parabolic and rectangular. These morphologies occur in the same interval, grading laterally into each other and forming connected structures linked by bridges. Silicified smooth laminites and pseudo-columns are characterized by numerous millimetric fractures and by abundant porosity filled by silica cement (Fig. 4B–C). In the columns, laminae are inflected with partial to extensive recovering and locally exhibit micro-unconformities. Columns have a straight to slightly sinuous growth vector and abundant branches with parallel to divergent dichotomy. In plan-view, these structures are closely emplaced, round to oblong (Fig. 4D) and are locally interconnected. Smooth lamination presented commonly disrupted in thin-sections composed predominantly of micrite with rounded and ellipsoidal silicified bodies. These structures were also observed under SEM where spheres with ~10 µm in diameter are associated with elongated varieties, ~15 µm in length (Fig. 5A–B). SEM analysis also revealed the presence of small clusters (up to 10 µm in diameter) of cubic to rounded crystals resembling framboidal pyrite (Fig. 5C). The carbonate fabric is strongly silicified, although it kept its original morphology.

5.1.2. Interpretation

In general, the bioherms begins with smooth laminites that grade upwards into pseudo-columns and finally culminate indistinct columns at top. This arrangement does not necessarily represent a deepening-upward cycle but may just exemplify a setting, in which environmental parameters, such as accommodation space, hydrodynamics and sediment dispersion, vary (Andres and Reid, 2006). In this way, the commonly observed branching and dichotomy in the columns are probably directly related to oscillations in the hydrodynamic conditions. Columns connect each other by bridges/menisci in association with wrinkle lamination and absence of detrital components suggesting carbonate precipitation induced by microbial activity (*sensu* Dupraz et al., 2009) and not by trapping and binding of particles by filamentous cyanobacteria (see Reid et al., 2000). Spheres and elongated shapes as well as pyrite presence suggest sulphate reducing bacteria entombed in the inner portions of the mat.

5.2. Isolated cone-shaped stromatolites

5.2.1. Description

Isolated to loosely grouped silicified conical columns occur directly above basement rocks in area of approximately 1600 m² at the Curralinho site. Cone-shaped stromatolites may reach a height of 30 cm and a diameter of 5 to 10 cm and usually grow as spaced, straight to slightly curved constructions with elliptical contours. Cones occur as three different morphologies: bulbous overarching cone, cone without axis, and cone with axis. Usually, bulbous cones grade into cones without axis (Fig. 6A) and are uniformly laminated. Cones with axis (similar to *Conophyton*) show typically a wrinkled lamination and possess an irregular axial zone, uneven column margins and do not branch (Fig. 6B). In all three morphologies the lamination is highly inflected and micro-unconformities are present. Millimeter-scale light laminae alternate with wrinkled, dark, organic-rich laminae. Small spheres (75 µm in diameter) and ellipsoids (200 µm) are very common in both dark and light laminae. Particularly in dark laminae they are commonly associated with articulated and disarticulated ostracodes (Fig. 7A–B). SEM analysis revealed intense recrystallization with growth of hexagonal quartz crystals (Fig. 5D). Despite intense recrystallization of the original carbonate fabric, some phyllosilicates are still preserved (Fig. 5E).

5.2.2. Interpretation

Conophyton-like stromatolites are a typical biologically influenced morphology that is usually assigned to relatively deep-water settings (Coffey et al., 2012). In modern environments, the separation between

cones is interpreted as the result of competition for nutrients between neighboring microbialite colonies in weakly turbulent environments without terrigenous input (Petroff et al., 2010). The here reported conical stromatolites have a bulbous morphology with uniform laminae that progressively overgrow each other to form typical cones with wrinkled lamination. This suggests that growth was strongly influenced by the dynamics of the microbial colony, probably in a quiet environment affected by progressive increase in water depth. Despite the relatively greater water depth in which the stromatolites grew, basement pebbles are still present, revealing a close source area and probably a still relatively shallow setting.

5.3. Isolated domal stromatolites

5.3.1. Description

Up to 10-cm-high and 20-cm-wide silicified domal microbialites occur dispersed in the stromatolite field of the Curralinho site above basement rocks. The domes are rectangular in cross-section and consist of symmetrically stacked curved and highly inflected laminae. Domes locally are developed on top of 10-cm-large oncoids. The oncoids are composed of thin, wrinkled laminae, occasionally disrupted by micro-unconformities, that coat a single carbonate core (Fig. 4C). The domes usually do not branch and have a straight growth vector. In transverse section this type of microbialite consists of isolated round oblong bodies. Smooth, planar lamination is observed in thin-sections. Laminae are characterized by silicified micrite commonly associated with peloids. SEM analysis revealed the presence of several up to 1-µm-sized spheres (Fig. 5F) and also filaments within the matrix (Fig. 5G).

5.3.2. Interpretation

Oncoids are concentrically laminated carbonate grains formed in shallow water bodies by alternating periods of agitation and absence of flux (Gerdes et al., 1993). The presence of micro-unconformities between wrinkle lamination suggest periods of reworking followed by microbial accretion during quiet periods (e.g., Lanés and Palma, 1998). After the initial phase of oncoid formation, marked by fluctuations in water energy, succeeded a period of stabilization, during which the oncoids were completely covered by microbial colonies, forming rectangular-laminated domes. This domal morphology suggests accretion under high-energy and shallow-water conditions, probably connected with frequent phases of subaerial exposure.

5.4. Columnar stromatolite bioherms

5.4.1. Description

Up to 15-cm-high and >>1-m-wide bioherms with rectangular shape overlie silicified domes and occurred below the intraformational conglomerate facies in the Curralinho section (Fig. 2B). This bioherm type differs from most microbialite once facies are non-silicified composed by calcite. Bioherms are composed by smooth laminites that grew into cylindrical columnar stromatolites with inclined growth vector (Fig. 8A). Cylindrical columns occur as connected and coalescent structures with moderate to high laminar inflection (Fig. 8B–D). The stacking pattern of columns is symmetric with highly convex smooth laminae. Parabolic and pseudo-columnar morphologies co-occur with the cylindrical columns. Columnar stromatolites commonly branch dichotomously (Fig. 8E). The branches run parallel and touch each other. In plan-view, the columns are rounded to elongated and often connected (Fig. 8F). In thin-sections, laminae are up to 0.5-mm-thick, whereby light sparitic laminae are intercalated between dark micritic ones (Fig. 7C). Scattered opaque minerals are observed between laminae. Some dispersed minerals show high birefringence (Fig. 7D), and a few articulated ostracodes are filled with chalcedony (Fig. 7A). Isolated

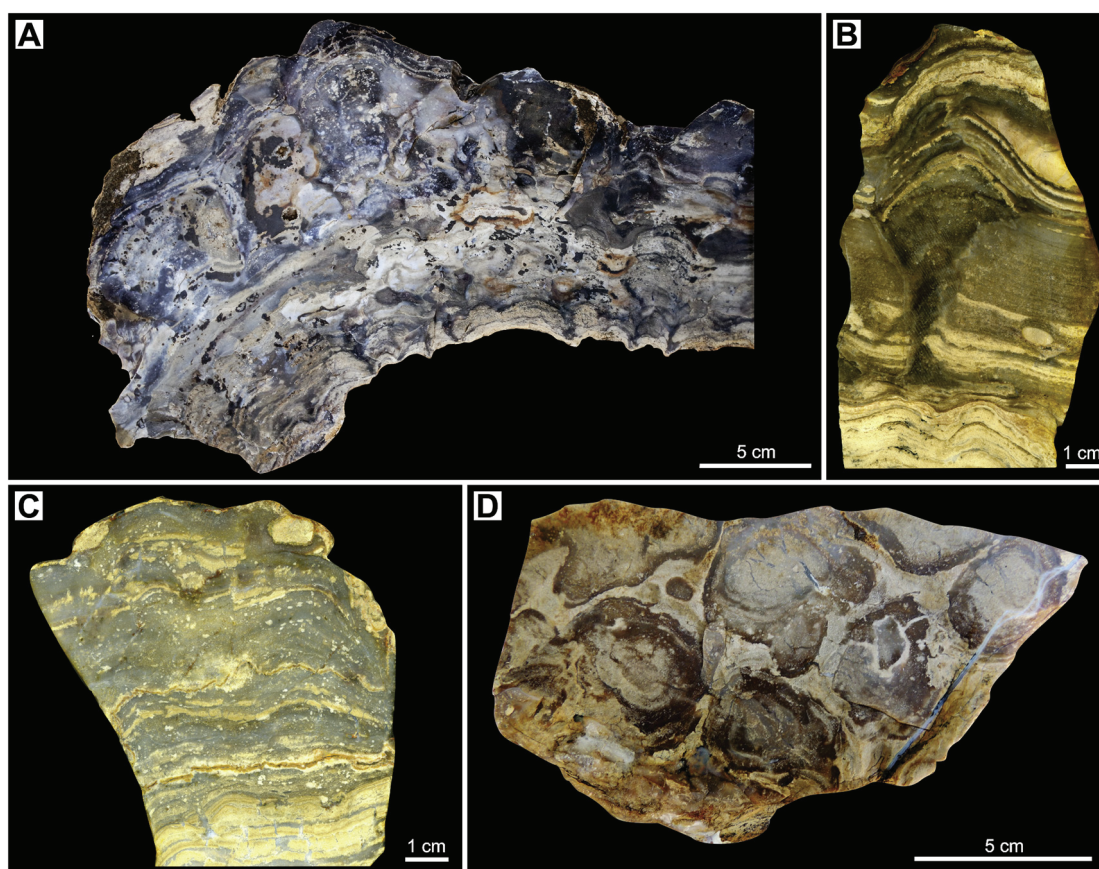


Fig. 4. Cauliflower bioherms. A: General morphology and internal arrangement of pseudo-columnar and columnar stromatolites. B: Pseudo-columnar stromatolite growing above a cracked microbial laminite. C: Silicified smooth laminites and pseudo-columns with cracks characteristic of subaerial exposure. D: Plan-view of columnar stromatolites showing closely spaced to intergrown irregular outlines.

and grouped filaments are abundantly preserved within the stromatolites (Fig. 5H–I).

5.4.2. Interpretation

Similar to the cauliflower bioherms, this stromatolite type shows a typical transition pattern between smooth laminites, pseudo-columnar and, finally, columnar morphologies. Contrary to the cauliflower bioherms, the lamination in this facies is smooth, and the columns coalesce with no gaps between them. In addition, there is a predominance of single cylindrical columns without gap between laminae. Straight and highly convex cylindrical columns predominate and suggest that they formed during a progressive increase in water depth. Variations in the hydrodynamic conditions probably are the cause of the branching with parallel dichotomy developed towards the top of the bioherms. Scattered ostracodes and basement minerals suggest that besides authigenic precipitation of carbonate by microbial activity, trapping and binding also contributed to microbialite growth. Preservation of abundant bacteria filaments is favored by conservation of original carbonate minerals.

5.5. Smooth laminites

5.5.1. Description

Smooth laminites occurred between stromatolite facies in both the Curralinho and Alagoinha sections, commonly forming laterally continuous biostromes (Fig. 9A–C). Laminites form up to 2-cm-thick beds commonly showing V-shaped cracks at their top. Occasionally, these cracks disrupt the lamination which results in rectangular clasts constituting intraformational conglomerates (Fig. 9B). In addition, locally cracked structures occur in these intervals (Fig. 9A). In thin-sections,

the lamination is characterized by well-defined alternations of dark, micro-peloidal laminae and light sparitic laminae with peloids (Fig. 10A). Peloids in the sparitic part are larger than in the dark laminae and are characterized by round and ellipsoid shapes (Fig. 10B). Spherulites are abundant in the dark laminae (Figs. 5J–L, 10C). Also common are fish bones and scales (Fig. 10D).

5.5.2. Interpretation

Smooth laminites are interpreted as lithified microbial mats formed in very shallow waters. Cracked bed planes are strong evidence of intermittent subaerial exposure and symsedimentary lithification. Spherulites are commonly associated with microbial deposits formed in saline and alkaline waters in the presence of organic acids typically found in EPS (Mercedes-Martín et al., 2016; Chafetz et al., 2018). These are usually formed by precipitation of radial aragonitic crystals around peloids formed by coalescence of carbonate nanoglobes around degraded organic matter (Spadafora et al., 2010). In this way, the smooth laminites are interpreted as lithified microbial mats that generated in shallow restricted settings, probably intertidal to supratidal settings, indicated by the presence of spherulites, peloids, and sedimentary cracks.

5.6. Intraformational conglomerates

5.6.1. Description

Thin conglomerate layers are common in the upper part of the Curralinho stromatolite sequence in close association with smooth laminites (Fig. 9D–E). They consist of up to 1-cm-high, 4-cm-wide, and 10-cm-long rectangular-shaped, imbricated clasts with rounded edges. Clasts are composed of light-colored microsparite with absent

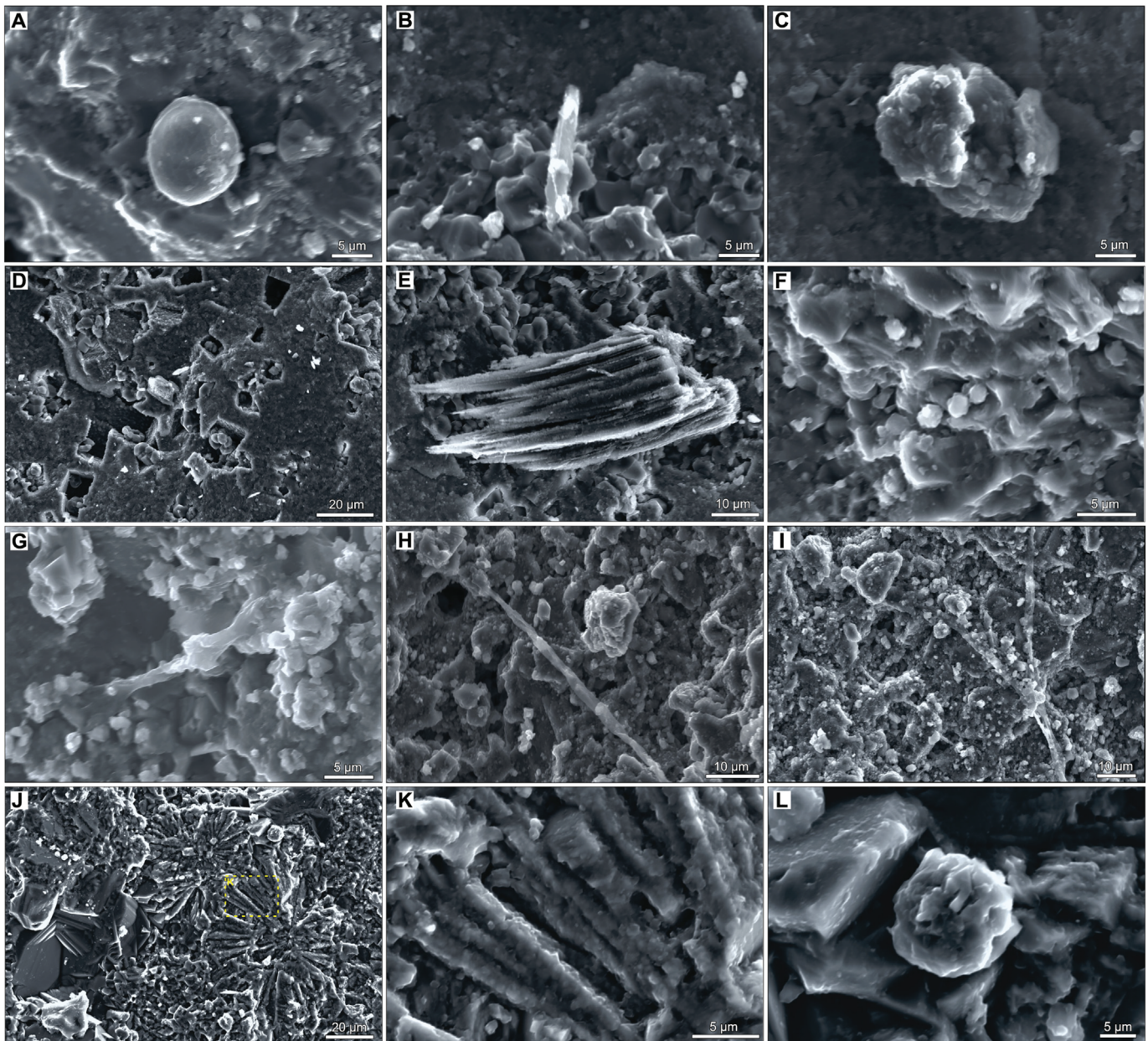


Fig. 5. SEM images of the microbialite facies. A: Coccoid microbe. B: Preserved elongated cell. C: Pyrite framboid. D: Highly silicified stromatolite. E: Phyllosilicate grain preserved in a silicified microbialite. F: Coccoid cells. G–I: Microbial filaments. J: Spherulites with typical radial arrangement. K: Detail of the radial structure of a spherulite represented in J. L: Probable framboidal pyrite associated with spherulites.

internal lamination and contain small vugs filled with silica. The matrix is typically dark micrite containing small calcispheres with radial extinction.

5.6.2. Interpretation

Formation of the pebbles was facilitated by the V-shaped cracks in the smooth laminites and their in-situ brecciation. Reworking events probably were only brief. The rounded edges of the clasts may indicate that the reworked layers were not fully lithified. Imbrication suggests the presence of bottom currents as transport agents of the clasts in intertidal to supratidal settings.

5.7. Stromatolite-thrombolite bioherms

5.7.1. Description

Up to 30-cm-high and approximately 1-m-wide bioherms of columnar stromatolites and thrombolites occur above basement rocks in the

Alagoinha section (Fig. 11A–D). Columnar stromatolites are characterized by parabolic to convex laminae and thrombolytic (clotted) fabrics (Fig. 11B–C). They occur as columns occasionally linked by bridges. In plan-view, these structures are closely spaced and partly connected resulting in elongated outlines (Fig. 11A). Columns grew sinuously and commonly branch with both, parallel and divergent dichotomies (Fig. 11D). Internal lamination is smooth to slightly wrinkled and the stacking pattern is symmetric to asymmetric with partial to extensive recovering of laminae. Towards the upper part of the bioherms, smooth laminites interbedded with thrombolites are common (Fig. 11B). The thrombolites are characterized by clotted fabric with up to 2-cm-sized rounded and irregular clots of different shapes.

5.7.2. Interpretation

Thrombolites are very common in carbonate buildups and are characterized by macroscopically rounded to irregular clotted fabrics with a blocky, unlayered mesoscale fabric (Riding, 2000; Shapiro, 2000;

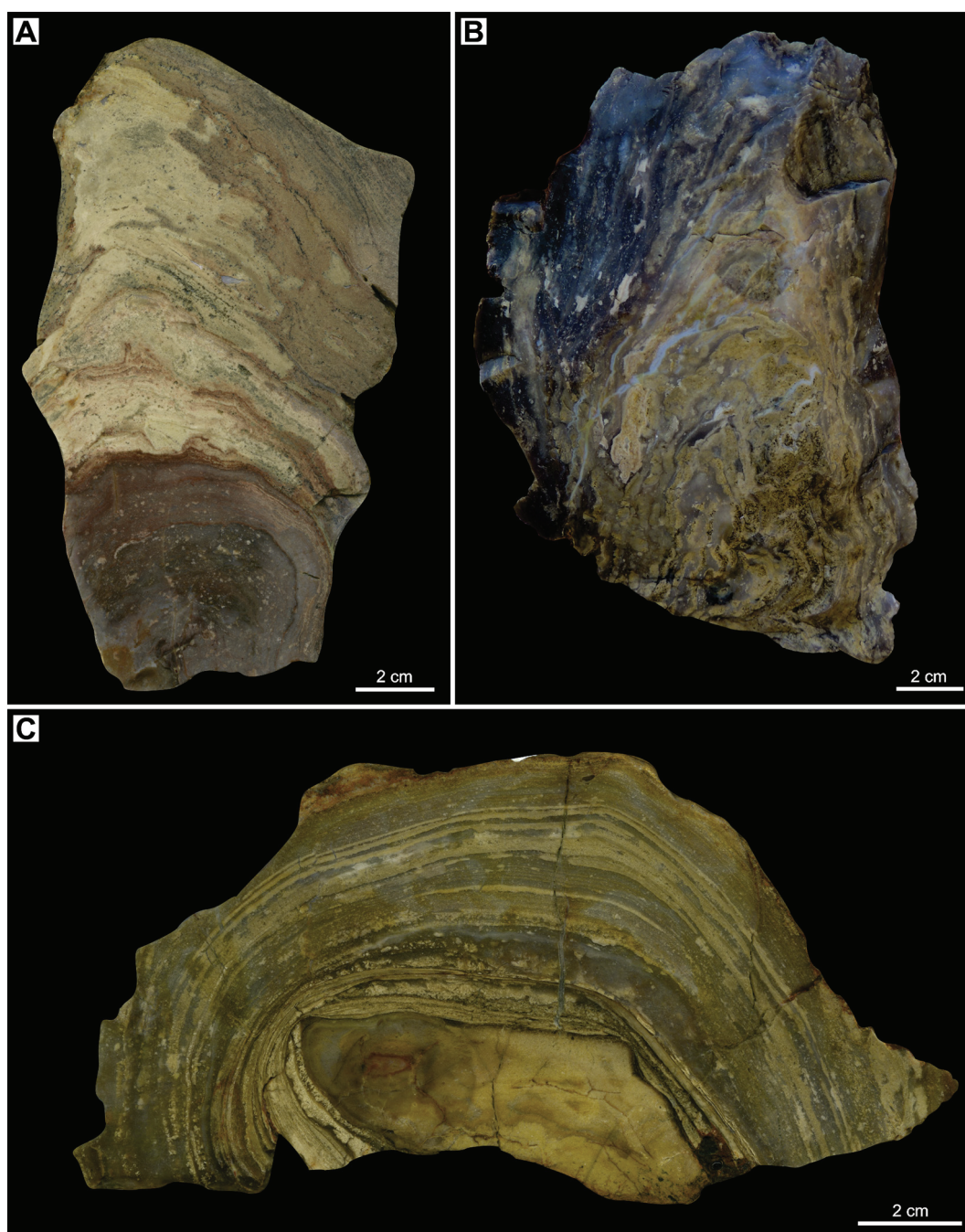


Fig. 6. Loosely grouped stromatolites. A: Bulbous stromatolite growing into conical morphology with wrinkled lamination. B: Cone-shaped stromatolite showing wrinkled lamination similar to *Conophyton*. C: Oncoid with a thin cortex overgrown by domal stromatolite.

Theisen and Sumner, 2016). The stromatolite-thrombolite bioherms are characterized by thick, massive, sub-parallel layers of thrombolite in association with columnar stromatolites. The alternation between stromatolites and thrombolites in the same bioherm is unusual - although the association of thrombolitic and stromatolitic structures within the same microbialite morphology is common in the Hamelin Pool, Shark Bay (see Burne and Johnson, 2012) - and may reflect a response to changes in environmental parameters, such as hydrodynamic conditions in the subtidal zone and/or variations in water depth (Feldmann and McKenzie, 1998). Although thrombolites occur in subtidal settings according to some scenarios, vertical growth of pustular laminae in shallow intertidal settings also produces mesoclotted fabrics (Jahnert and Collins, 2011). Regardless of the water depth, thrombolites are commonly associated with high energy settings. This can be confirmed

in the present case by abundant divergent dichotomy in the stromatolite-thrombolite columns. A third explanation for the co-existence of stromatolites and thrombolites might have been layer-by-layer formation of the thrombolite facies, with subsequent loss of the lamination during diagenesis (Theisen and Sumner, 2016).

5.8. Dome-shaped bioherms

5.8.1. Description

Up to 20-cm-high dome-shaped bioherms with a circular cross-section (40 × 40 cm) rest directly on basement rocks in the Alagoinha section. The bioherms are composed of a complex microbial frame work with domal stromatolites at the base and columnar stromatolites at the top (Fig. 11E–F). The 10-cm-high and 30-cm-wide domal

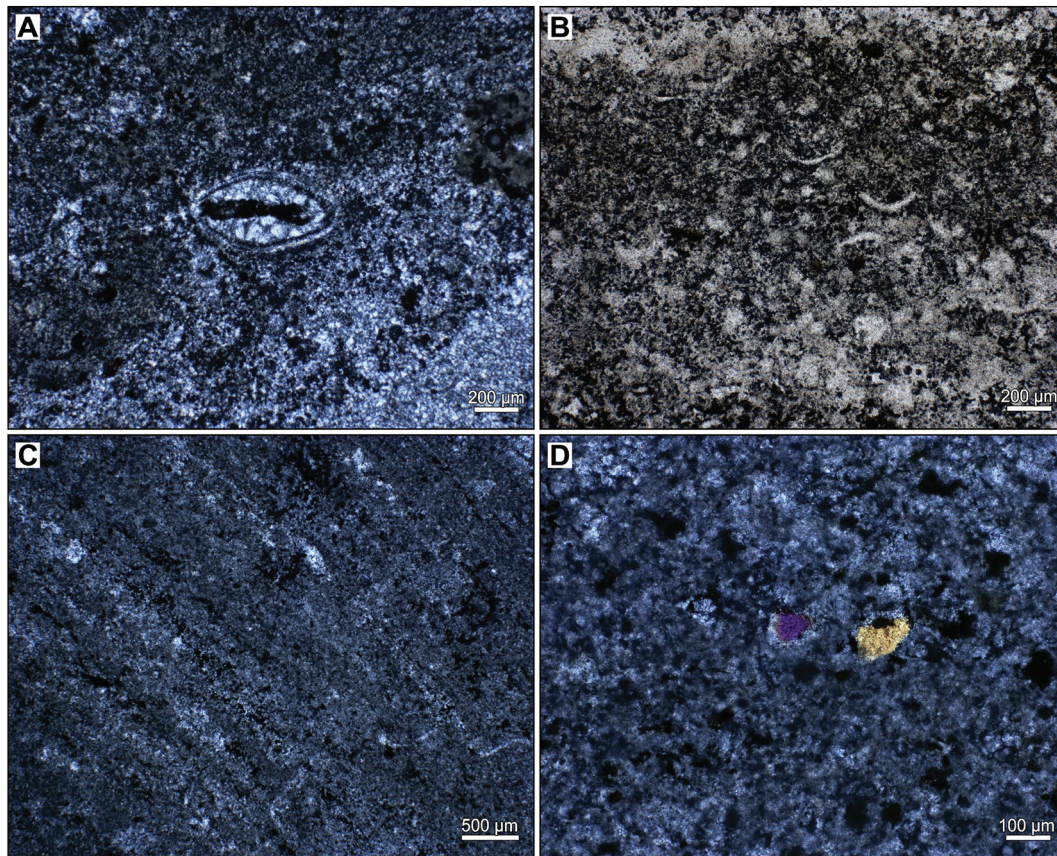


Fig. 7. Thin-sections of the microbial facies. A: Detail of a trapped articulated ostracod specimen filled with chalcedony (crossed nicols; 20 \times). B: Alternation of thick dark and light laminae with trapped single ostracod valve (20 \times). C: Detail of the fine lamination of columnar stromatolites (crossed nicols; 10 \times). D: High birefringence basement mineral grains (crossed nicols; 10 \times).

stromatolites have a single morphology with a circular core and a concentric, smooth to slightly curved lamination (Fig. 11F). In the upper part of the bioherms, columnar stromatolites changed morphologies from domes into cylindrical columnar stromatolites with an overall mushroom-shape morphology (Fig. 11E) characterized by straight, convex to rectangular growth surfaces, lacking branching. Columns coalesce, occasionally are linked by bridges, and are circular to elongated in plan-view. Lamination is smooth and symmetrically stacked, and laminae inflect downward with partial to extensive recovering of previous lamination.

5.8.2. Interpretation

Changes in the stromatolite morphology are mainly related to modification in physical parameters, even though it may be associated secondarily with modification within the surficial microbial communities (Dupraz et al., 2006). The transition between a single domal morphology into multiple columns records a physical change in the growth pattern of the described microbialite buildup, directly related to an increase in the sedimentation rate (Dupraz et al., 2006).

5.9. Echinoid-bearing microbial laminites

5.9.1. Description

Decimeter-thick layers of wrinkled laminites with abundant echinoids rest directly on the basement in the Sítio Canastra section (Fig. 12A). Abundant tests of *Bothriopneustes araripensis* are commonly found associated with the microbialites. They occur at the base and top of the microbialites but also between laminae (Fig. 12B). Most echinoid tests are arranged parallel to the microbial lamination with the aboral side facing upward (Fig. 12C–D),

but some are oblique and yet others exhibit an inverse orientation. The tests usually suffered compactional deformation and breakage, but in a few cases, their original shape is fully preserved. Oblique, horizontal and near-vertical burrows, some of them displaying meniscate structures, occur within the microbial laminate (Fig. 12E). In cross-sectional view, the height of these burrows varies between 6 and 11 mm. Occasionally, granite pebbles sourced from basement and reworked flat clasts eroded from nearby microbialites can be present embedded by wrinkle lamination (Fig. 12F).

5.9.2. Interpretation

The echinoid-bearing microbialites were generated under quiet water conditions, directly on the hard substrate represented by igneous and metamorphic Proterozoic basement rocks. Although the microbialites probably grew in a protected setting, the presence of pebbles and internal discontinuities point to growth interruptions and occasional reworking events. A characteristic feature of the echinoid tests is that on the oral side, the thickness of the plates is only half to one-third that of plates on the aboral side. During compaction, the tests cracked at the margins where oral and aboral sides meet. As a result, the oral part of the test was pushed inward often to the extent that hardly any space was left between oral and aboral side of the test, the curvature of both test parts being identical. However, not all echinoids are strongly compacted. In a few cases, they maintain fully or partly their original shape. In this case the test interior is filled with micrite, fine terrigenous material or both. All evidence cited above supports the hypothesis that the echinoids lived in direct association with the stromatolites in a similar way as recorded in Quaternary reefs in Tahiti (Camoin et al., 1999).

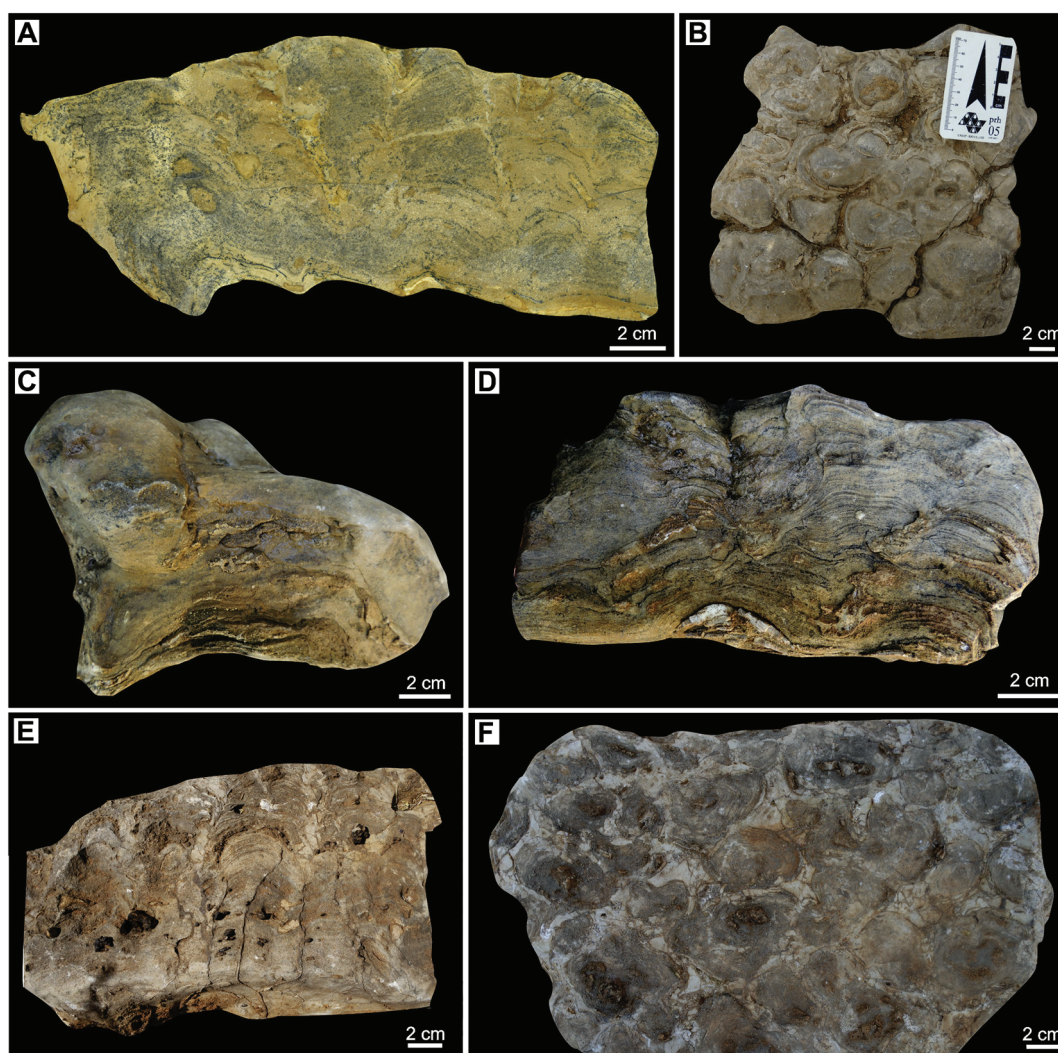


Fig. 8. Columnar bioherms. A: Coalescent cylindrical columns with curved growth vector. B: Upper view of the bioherm highlighting the round to elongated intergrown stromatolite columns. C: Single columns growing above domal stromatolite. D: Curved to sinuous columns which branch near the top. E: Straight cylindrical columns with parallel dichotomies at the top. F: Plan-view of a bioherm showing small round intergrown columns and larger, closely spaced elongated bodies.

5.10. Bivalve rudstones

5.10.1. Description

Well-cemented bivalve-rich rudstones are represented by up to 1-m-thick, clast-supported, amalgamated shell beds (Fig. 13A), resting directly on the basement. This facies is well exposed in the Araripina Hospital parking lot (Figs. 1 and 2B). The concentration is dominated by disarticulated bivalve shells and shell fragments (Fig. 13B–D). Closed articulated shells are also recorded. Shell fragments are usually rounded (abraded) and without signs of encrustation, bioerosion and corrosion (sensu Brett and Baird, 1986). The shells are more or less of the same size (≤ 1 cm), usually recrystallized, and many show compactional distortion. In plan-view, the shells are randomly dispersed in a sparite cement. In cross-sectional view, the shells ($n = 197$) are also randomly oriented: 34,5% are convex-up, 36,5% convex-down, and 29% oblique/vertical (see Fig. 13B). Shells are commonly nested or stacked. Two small, shallow burrowing species of the heterodont bivalve *Calva* account for the bulk of the shells, whereas gastropod shells are rare. The overall species diversity is very low.

5.10.2. Interpretation

This thick shell-rich deposit is mainly formed by disarticulated bivalve shells, some fragmented and rounded (abraded). The poor

preservation quality of the shells and evidence of size sorting clearly indicate that the shells were winnowed from the sediment by hydraulic processes and underwent extensive transport. The biofabric of this deposit records several high-energy events leading to repeated amalgamation (Fig. 13A). This is clearly a fair-weather shell concentration (sensu Fürsich and Oschmann, 1993), generated under high hydraulic energy conditions, accumulating directly on the hard basement rocks. However, some shells are still closed articulated, suggesting that these underwent only limited transport and sorting. As the dominant bivalves, two species of *Calva*, are shallow burrowers that clearly did not live on basement rocks. These bivalves are an important part of the benthic fauna in fine-grained siliciclastic sediments of the first TR cycle (Fürsich et al., 2019). Such deposits were removed by erosive transgression during the beginning of the second TR cycle, which led to the concentration of the shells as lags on the basement rocks. Alternatively, the bivalves were introduced from some distance. This would explain the high degree of sorting, because elsewhere in the Romualdo Formation *Calva* is generally associated with a number of gastropods, which are rare in the present concentration. Thus, the shell bed is a parautochthonous to allochthonous shell concentration (sensu Kidwell et al., 1986). This condition is similar to what exist in the *Fragum*-dominated coquina barrier from Shark Bay (Jahnert et al., 2012).

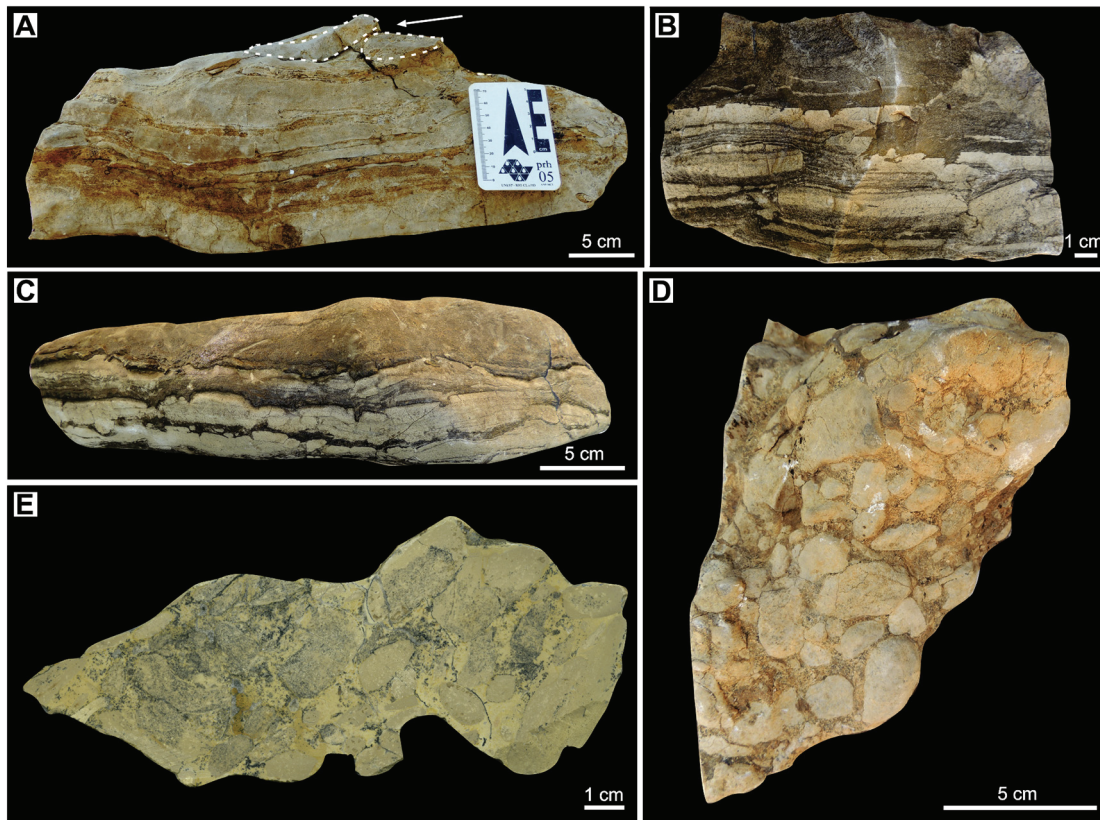


Fig. 9. Smooth laminites and rudstones. A: Cracked feature in the upper plane bed of a laminated limestone. B: V-shaped cracks leading to isolated clasts. C: Intensely cracked laminite. D: Plan-view of subangular to subrounded clasts of the rudstone facies. E: Polished cross-section of the rudstone facies showing dark-colored clasts and light-colored matrix. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

6. Stromatolite morphology and small-scale local environmental changes

Microbialites are defined as organosedimentary structures formed by the activity of benthic microbial communities, including stromatolites, thrombolites, microbial mats, and oncoids (Burne and Moore, 1987). Trapping and binding of sediment and microbially-induced/influenced calcification are the main processes involved in the formation of microbialites (Burne and Moore, 1987; see also Dupraz et al., 2009). Microbial precipitation of carbonate is essential and is achieved by photosynthetic removal of CO₂ under oxygenated conditions, which increases the pH of water, and also by bacterial sulphate reduction of heterotrophic communities within mats (Visscher et al., 2000; Dupraz et al., 2009). The dynamic balance between sedimentation and lithification of mats is required in the growth of different microbialite morphologies (Reid et al., 2000). Indeed, increase/decrease in accommodation space, sediment availability and variation in hydrodynamics are regarded as the main mechanisms in this process (Andres and Reid, 2006). In areas characterized by high sedimentation rates, filamentous cyanobacteria predominate, and microbial laminae tend to grow fast (Reid et al., 2000). With a decrease in the sedimentation rate, coccoid cyanobacteria modify the organization of the microbial colony and form thick laminae (Reid et al., 2000). Similarly, to the stromatolites, thrombolites reflect changing environmental and biological parameters and contribute to paleoenvironmental interpretations (Burne and Moore, 1987; Buongiorno et al., 2019).

Stromatolites of the Romualdo Formation are strikingly distinct in their macro-morphology (Figs. 4, 6, 8–11), suggesting that an interplay of physical and biological factors drove their formation at the depositional site. Indeed, the transition between distinct stromatolite morphologies reveals changes in environmental parameters (i.e., turbidity, energy and flux velocity) without necessarily involving a relative sea-

level variation (Andres and Reid, 2006). For example, in a depositional setting characterized by stable accommodation space creation with increase in calcium and carbonate accretion, microbialites begin to grow faster generating columns and protruding appendages (Andres and Reid, 2006). Bridged to coalescent columns suggest a low contribution of trapping and binding of sediment by strong currents and points to a high sedimentation rate with rapid laminar accretion (Andres and Reid, 2006). Also, the presence of branching forms, as well as the interaction of thrombolites and stromatolites, support the hypothesis of an increase in the accretion rate and water energy of the environment. In this way, the stromatolite-thrombolite association can be a product of in situ cementation of microbial communities under high-energy conditions (Feldmann and McKenzie, 1998; Jahnert and Collins, 2011) and indicate the transition of subtidal to intertidal settings with likely high influence of tidal currents and/or waves.

Oncoids occur coated by small stromatolite domes and suggest their formation in shallow water with alternating periods of agitation and absence of flux (e.g., Gerdes et al., 1993). These oncoids are the result of initial accretion of microbial biofilms in response to constant particle mobilization by waves, bottom currents or tide action and subsequent stabilization of the microbial mat due to the decrease in water energy. Towards the top of the succession, microbial mats with features indicative of subaerial exposure (e.g., polygonal cracks) dominated. These thin beds are characterized by cracked laminites with fitted polygonal and rounded clasts. Reworking of the cracked mat fragments by currents/waves in the inter to supratidal zone rounded the sharp edges of the platy clasts and produced thin beds of clast-supported conglomerates at the top of the preserved succession. During periods of high-energy events under the influence of tides and waves, the formation of intraformational clasts and internal discontinuities in some stromatolites point to interruptions

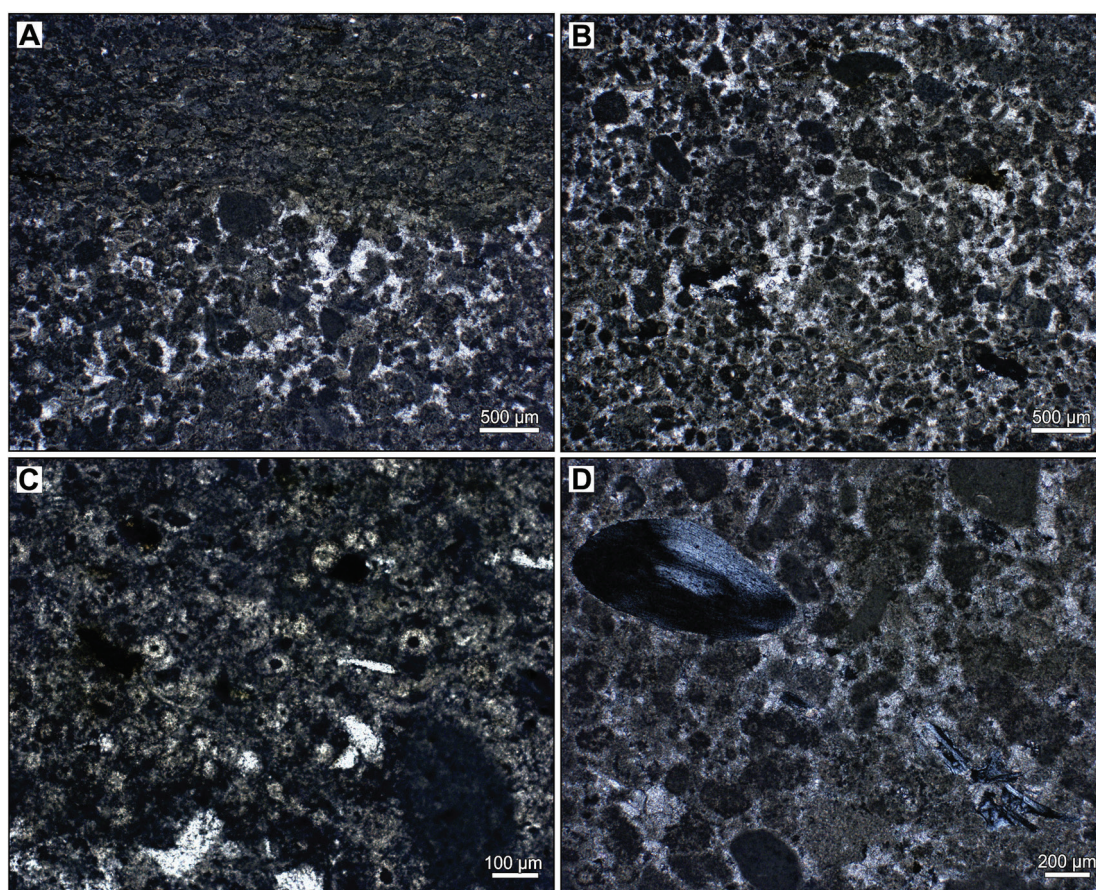


Fig. 10. Petrographic analysis of the smooth laminites. A: Fine interlamination of dark, spherulite-rich mudstone and peloidal grainstone (10×). B: Peloids cemented by sparite (10×). C: Spherulites in the dark, organic-rich mudstone (50×). D: Phosphatized fish scales (crossed nicols; 20×).

in the growth/accretion of the microbialites and subsequent occasional subaerial exposure and reworking events.

Despite the scattered geographic distribution of the microbialites in the Romualdo Formation, the diversity of morphologies recorded at least in two described sections (Fig. 2B), suggests that several environmental and/or biological processes were responsible for their morphogenesis. In this context, the interaction of some microbialites and echinoids is quite intriguing (Sales, 2005, p. 98). The echinoids discussed here occur not only at the base and the top but also between the laminae of microbialites. The vast majority of the echinoids in the studied laminites belong to *B. araripensis*. The specimens are usually oriented parallel to the microbial lamina with the aboral side facing upward. In some cases, oblique, horizontal and near-vertical burrows connect with the tests. This highly suggests that the echinoids moved (at least facultatively) within the soft substrate of the microbial mats, searching for shelter and/or food. In fact, based on the morphology of the tests, Beurlen (1966) had already suggested that this species was an epifaunal or a semi-infaunal form, which moved slowly through the soft substrate (see also Manso and Hessel, 2007, p. 276). The high number of complete echinoid tests in some layers and their association with oblique, horizontal and near-vertical burrows suggests a specific time interval of profuse proliferation of these invertebrates during the sedimentation. These occurrences suggest that the irregular echinoids of the Romualdo Formation lived in close association with mat-dominated bottoms in a period of pronounced marine incursion in the basin. This apparently contradicts the notion that mat-dominated bottoms formed in aquatic settings free of metazoans (see also Riding, 2006 for a detailed discussion of this issue).

7. Stratigraphic relationships at the western margin of the Araripe Basin

Shell-rich beds are a conspicuous feature of the transgressive deposits of the upper T-R cycle of the Romualdo Formation (Fürsich et al., 2019). Depending on their occurrence within the basin they are dominated by bivalves (*Bakevella*, *Calva* and *Sinonia*) and/or gastropods (cerithiids and cassiopids) (Fürsich et al., 2019). Due to their wide lateral distribution across the basin, these deposits are key stratigraphic markers. In the eastern part of the Araripe Basin, the matrix of the shell beds is mainly mixed carbonate-siliciclastic, and the concentrations are interpreted as having been deposited above the storm wave-base, but below the fair-weather wave-base (Fürsich et al., 2019). In contrast, at the western margin of the basin, the bivalve-rich shell concentrations are less common, occurring in the Serra do Inácio and Caldeirão Grande sections (Fig. 2A), located at the southwestern and northwestern margins, respectively.

The western margin of the Araripe Basin is characterized by thin carbonate-dominated successions directly overlying basement rocks. Although they are apparently positioned at the same stratigraphic level, the facies association indicates that they should be part of different T-R cycle. At the Sítio Alecrim section, nearly 10 km far from the main stromatolite field (Fig. 2), siliciclastic-dominated deposits of the Romualdo Formation are also discordantly overlying the basement. These are mainly represented by a 5-m-thick succession of interbedded sandstones and shales including numerous fish-bearing concretions, constituted by both marine and non-marine assemblages (Fara et al., 2005; Fig. 2A). At the eastern margin of the Araripe Basin, coeval fossil-rich, laminated shales of the Romualdo Formation are associated to transgressive deposits of the lower cycle of this unit, representing

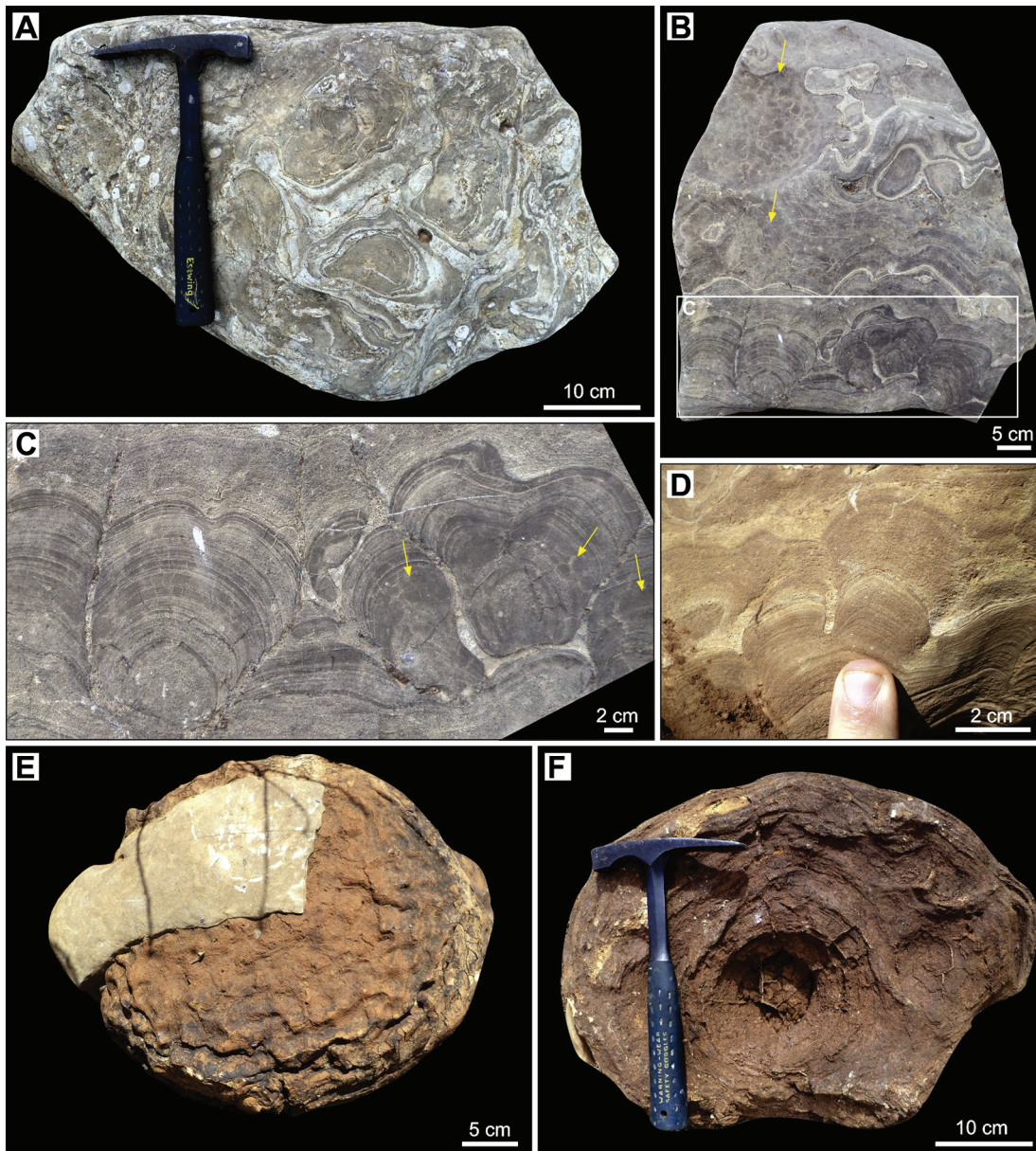


Fig. 11. Bioherms from the Alagoinha stromatolite field. A: Plan-view of bioherm showing irregular intergrown bodies. B: Thrombolite-stromatolite bioherm. C: Detail of B showing branching columnar stromatolites. D: Parallel dichotomy growing into a coalescent structure. E: Mushroom-shaped bioherm showing wrinkled top marked by coalescent columns. F: Lower view of the mushroom-shaped bioherm showing its early domal growth stage. Photo credits to Celso Lira Ximenes.

low energy, dysoxic to anoxic bottoms, generated below storm wave-base (Custódio et al., 2017; Fürsich et al., 2019). The occurrence of such concretion-bearing shales also at the western margin of the basin is a noteworthy evidence that this first transgressive event was widespread and occurred before the deposition of the shell beds and stromatolite fields (see diagram in the Fig. 1).

At the Serra do Inácio locality (Fig. 2), the sedimentary succession correlates to that described for the Sítio do Alecrim section, but the 40-m-thick sedimentary succession includes sandstones deposited in alluvial to coastal settings at the base. These are succeeded by concretion-bearing black shales with abundant, well-preserved fishes, deposited in inner to outer shelf settings, indicating a rapid transgression. Overlying this shale interval, shell-rich carbonates with abundant bivalves are also recorded. As for the Sobradinho section, the Serra do Inácio deposits occupies a more distal position along an onshore-offshore profile. In the Caldeirão Grande section (Fig. 2A), the shell beds were recorded a few meters above the crystalline basement. This means that those shell beds belong to another transgressive event

onlapping the basement (i.e., the upper T-R/C) and represent shallower deposits in relation to those from the Serra do Inácio and Sobradinho sections, although probably time equivalent.

The microbialite fields at the westernmost outcrops of the Romualdo Formation, microbialites rest directly on the basement (Fig. 2B). The shallowing-upward stacking pattern observed in the stromatolite fields, is represented by conical isolated forms at the base and microbial mats with subaerial exposure at the top evidence of a regional small-scale relative sea-level fall. Conical stromatolites indicate a relatively deep subtidal, low-energy environment, formed in the absence of sedimentation (see Petroff et al., 2010), while subaerially exposed microbial mats and their reworked clasts point to high-energy, shallow-water conditions, probably in the inter-supratidal settings, possibly within a drying up embayment area. In this scenario, variations in water energy occurred, during the transition from pseudo-columnar to columnar stromatolites in single bioherms, and respond for other stromatolite morphological changes. This

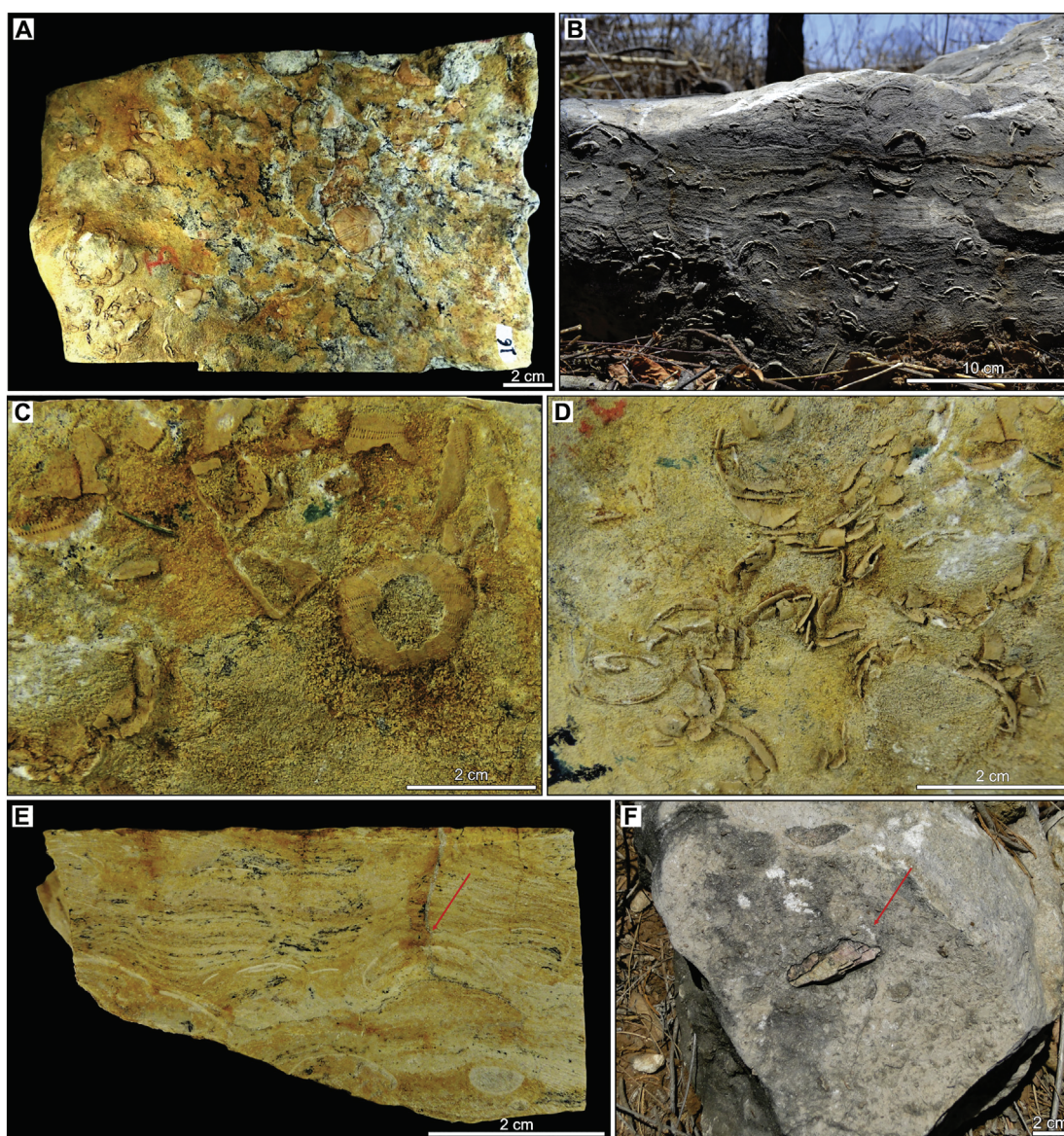


Fig. 12. Echinoid associated to microbial laminites. A: Plan-view of microbial laminite with abundant tests of echinoids. B: Preferential convex-up orientation of echinoids concordant to microbial lamination. C–D: In situ fragmented echinoid tests. E: Bioturbation associated with echinoids in life position (arrowed). F: Subangular basement clast (arrowed) incorporated in the echinoid-rich laminite.

indicates that the embayment area had restricted connection with open marine waters, which increased the potential and strength of tidal currents.

The accretion of stromatolites above the basement required an important transgressive event. This transgression was probably very quick and erosive, due to the lack of typical shales. In this context, the beginning of deposition of stromatolites may have occurred during transgression, which means that the maximum flood surface (MFS) is positioned in the lower part of the stromatolite fields. Overall, the deposition of most part of these microbialites represents the beginning of the upper regressive cycle (i.e., above the MFS of the second TR cycle), right after the formation of the shell beds in distal depositional settings and the deposition of the first stromatolites. This situation represents the stacking of laterally distinct sedimentary facies. At the time when shell beds were emplaced in inner shelf settings (offshore transition, between the storm and the fair-weather wave-base), stromatolites were thriving in shallow water embayments near the coastline at the western margin of the basin. With the beginning of the regressive stage, the sites where earlier on storm-wave concentrations formed were transformed into several

embayments surrounded by basement highs favoring the growth of microbialites.

As mentioned before, shell beds are not restricted to the storm-wave concentrations described above. In the town of Araripe, Ceará State, lag deposits of the Romualdo Formation were recorded directly above the basement rocks in the Hospital section (Fig. 2B). These represent amalgamated paucispecific shell beds composed of shallow-burrowing, suspension-feeding bivalves and mobile gastropods that probably inhabited shoreface bottoms. The shells are highly abraded, rounded, and sorted, suggesting deposition in a shallow, high-energy setting above the fair-weather wave-base. The composition of these shell beds distinctly differs from the bivalve-gastropod-rich beds, representing fair-weather concentrations in the shallower area of the embayment area.

In summary, during transgression, the coastal areas of the Araripe Basin were flooded generating embayments flanked by crystalline rock promontories. In this context, the MFS of the second TR cycle represents a phase where embayment bottoms along the western margin of the basin were colonized by benthic invertebrates (mainly mollusks)

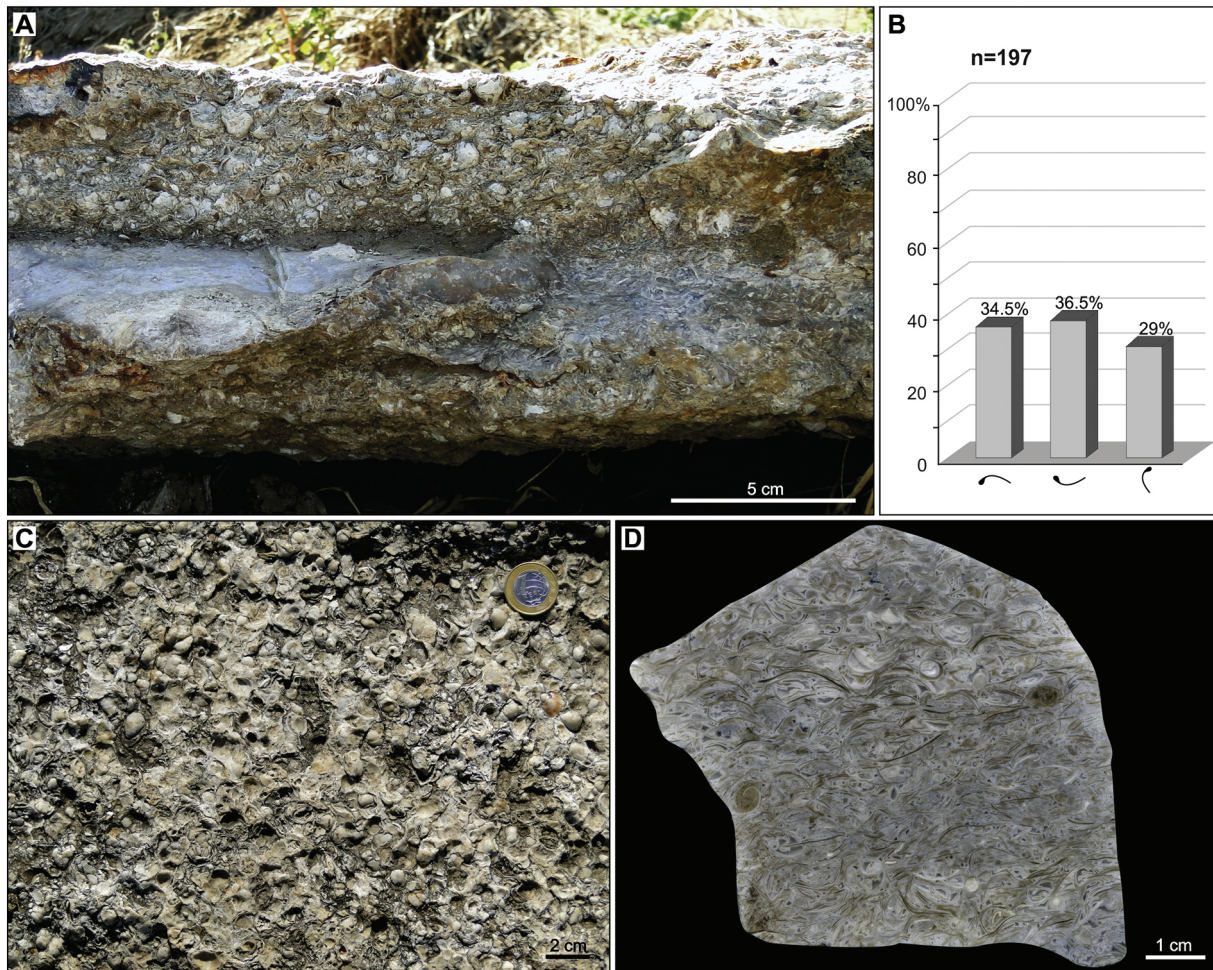


Fig. 13. Bivalve rudstone. A: Amalgamated shell beds. B: Predominantly disarticulated shells with few articulated individuals. C: Random orientation of bivalve shells.

and by the first stromatolites in the shallow zones. During the beginning of the subsequent regression ideal conditions existed for profuse stromatolite development. In this scenario echinoids colonized parts of mat-dominated bottoms in the embayments at the western margin of the Araripe Basin.

8. The shallow carbonate ramp of the Romualdo Formation – a Cretaceous analogue of the Shark Bay, Australia

The Hamelin Pool in Shark Bay World Heritage area, Western Australia, is a hypersaline-restricted embayment sectioned by several tidal channels (Jahnert and Collins, 2011, 2012). This particular area is famous for the great diversity of modern microbialites that were formed in response to sea-level fall after the Holocene transgression (Jahnert and Collins, 2011, 2013; Burne and Johnson, 2012). During this event, a near open marine system became a restricted embayment characterized by anomalous salinity (hypersaline), high alkalinity and evaporation rates. Such unusual environmental conditions restrict profuse benthic metazoan colonization of bay bottoms, enhancing the proliferation of microbial communities (Jahnert and Collins, 2011). Smooth stromatolites and thrombolites are common in the intertidal zone, and microbialites with cerebroid external morphology and non-laminated microbial internal fabric tend to occur in deeper waters associated with serpulids and other metazoans (Jahnert and Collins, 2011, 2012). Despite their marked variation in shape, the microbialites in Hamelin Pool exhibit internal morphologies indicating shallowing-upward carbonate cycles (Jahnert and Collins, 2011, 2013). The various microbial facies are commonly associated with bioclastic deposits and storm-

generated shell beds composed of bivalves in subtidal embayment areas or as beach ridges (Jahnert and Collins, 2011, 2012). The abundance of bivalve shells that proliferated within the embayment during the early stages of hypersalinity is striking (Jahnert and Collins, 2011).

As mentioned before, the Romualdo Formation encompasses a very thin carbonate succession that onlaps abruptly the igneous and metamorphic basement rocks at the western margin of the Araripe Basin (Fig. 14). These carbonate deposits consist mostly of bivalve, gastropod and echinoid rudstones, bioclastic grainstones and mudstones in association with microbialites. The great variety of microbialite morphologies just above the basement is a record of a shallowing-upward pattern with a regressive architecture after the widespread transgression that deposited bivalve/gastropod shell beds and at least part of the basal portion of the stromatolites, an analogous condition to the present-day Shark Bay. As discussed above, low-lying basement areas of the coastline were drowned during the marine transgression. Progressive sea level rise in these proximal and restricted areas resulted in embayments were low-diversity communities dominated by bivalves or gastropods thrived. When the sea-level started to rise at a slower rate, a regressive pattern took over and several restricted embayments formed favoring microbialite formation. Due to the high salinity, echinoids apparently were the only macrobenthic organisms that were able to thrive in this setting, most likely feeding on the stromatolites. Some burrowed inside the microbial mats where they finally became entombed. Others that grazed on the mat surface remained in their life position after death due to the sticky nature of the surface and were subsequently overgrown by microbial laminae. Thus, the preservation potential of the echinoids was very high despite their common subsequent

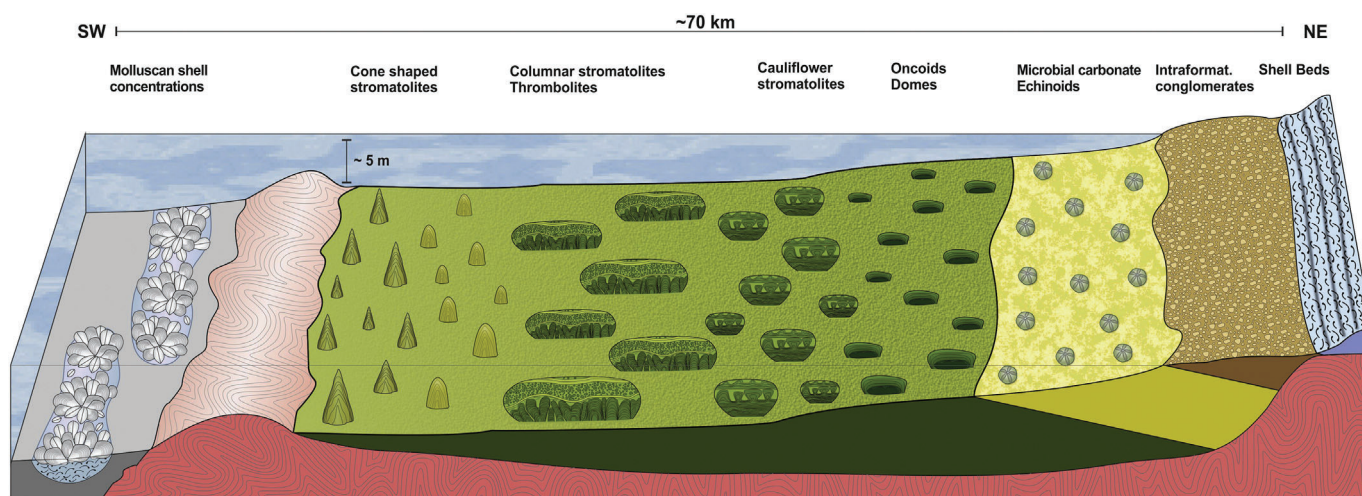


Fig. 14. Idealized block diagram of the stromatolite field at the westernmost occurrences of the Romualdo Formation onlapping on basement rocks.

compactional fragmentation (for further discussion on the microbial entombment processes see Iniesto et al., 2013). In these shallow areas, dead mollusks were repeatedly reworked by storm-induced waves and currents resulting in the formation of cm-thick shell beds that may have accumulated by fair-weather waves. Similarly, to the Hamelin Pool (Jahnert and Collins, 2011), abrasion, dissolution and microbial bioerosion of shells are thought to have been the most probable source of calcium ions for the stromatolite accretion, in an overall hypersaline condition.

In conclusion, part of the microbialites document the MFS in the western border of the Araripe Basin. The base of these deposits is here considered a transgressive surface. A probable erosive transgression likely removed shale deposits, which is revealed by a very thin MFS in the area. The overall regressive stacking of the great part of the stromatolites reveal that they are also part of the regressive cycle and can be considered a plausible analogue of the modern Hamelin Pool, Shark Bay, Australia. The here proposed model is coherent, if we assume a coastal setting where the stromatolites, echinoid-bearing microbialites, and shell beds generated by fair-weather conditions coexisted (Fig. 14).

9. Final remarks

The microbial facies herein described consist of diverse types of microbial mats, stromatolites, oncoids and thrombolites, arranged in shallowing-upward carbonate cycles. These suggest changes in water depth and hydraulic conditions during the deposition of the carbonate-dominated sedimentary succession. The co-occurrence of microbialites with autochthonous benthic invertebrates, especially echinoids indicated that these lived and thrived in the same environment where the microbial mats flourished, similar to what is observed in Hamelin Pool, Shark Bay, Australia. High salinity and elevated pH conditions both created stressful conditions that precluded the development of abundant and diverse metazoans that could proliferate on microbial mats environments. Such particular conditions allowed them to grow and form dm- to m-high bioconstructions. Various taphonomic and sedimentologic features indicate that only the echinoids lived in close association with the microbialites, probably using them as a source of food.

Finally, the record of several types of microbialites in the western part of the Araripe Basin represents the final stages of the last marine incursion during the Aptian. The stratigraphic position of these deposits in the upper part of the Romualdo Formation is coherent with the gradual migration of the coastal onlap to the west, reaching the most inland parts of the Cretaceous interior basins of the northeastern Brazil.

Acknowledgements

We would like to acknowledge the financial support by the São Paulo Research Foundation (FAPESP; grants 2016/13214-7, 2017/20803-1; 18/01750-7); Petrobras (2014/00519-9), and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; grants 444070/2013-1, 401039/2013-5, 1082 30017/2015-3, 152385/2016-9, 301294/2018-6). We thank Robert Burne and Ricardo Jahnert for their careful revision of the manuscript and very useful comments and corrections, which substantially improved the final version of this contribution. We also thank the Agência Nacional de Mineração (former Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM) for providing us with all fossil collecting permits and Celso Lira Ximenes for giving us information and pictures of the Alagoinha microbialite field. We are grateful to UNESPetro-UNESP for making its laboratories available for part of this research. F.G. Varejão, S.A. Matos and M.G. Rodrigues are FAPESP fellows; M.G. Simões, M.L. Assine, and L.V. Warren are CNPq fellows; and F.T. Fürsich was a CNPq-PVE fellow from 2015 to 2017.

References

- Andres, M.S., Reid, R.P., 2006. Growth morphologies of modern marine stromatolites: a case study from Highborne Cay, Bahamas. *Sedimentary Geology* 185, 319–328.
- Assine, M.L., 2007. Araripe Basin. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15, 371–389.
- Assine, M.L., Perinotto, J.A.J., Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., Mescolotti, P.C., 2014. Depositional sequences of the Alagoas Stage, Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Boletim de Geociências da Petrobras* 22, 3–28.
- Beurlen, K., 1966. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 38, 455–464.
- Brett, C.E., Baird, G.C., 1986. Comparative taphonomy: a key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaos* 1, 207–227.
- Buongiorno, J., Gomez, F.J., Fike, D.A., Kah, L.C., 2019. Mineralized microbialites as archives of environmental evolution, Laguna Negra, Catamarca Province, Argentina. *Geobiology* 17, 199–222.
- Burne, R.V., Johnson, K., 2012. Sea-level variation and the zonation of microbialites in Hamelin Pool, Shark Bay, Western Australia. *Marine and Freshwater Research* 63, 994–1004.
- Burne, R.V., Moore, L.S., 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaos* 2, 241–254.
- Camoin, G.E., Gautret, P., Montaggioni, L.E., Cabioch, G., 1999. Nature and environmental significance of microbialites in Quaternary reefs: the Tahiti paradox. *Sedimentary Geology* 116, 271–304.
- Catto, B., Jahnert, R.J., Warren, L.V., Varejão, F.G., Assine, M.L., 2016. The microbial nature of laminated limestones: lessons from the Upper Aptian, Araripe Basin, Brazil. *Sedimentary Geology* 341, 304–315.
- Cavalcanti, V.M.M., Viana, M.S.S., 1990. Faciologia dos sedimentos não-lacustres da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil). *Atas do 1º Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*. Crato 193–207.
- Chafetz, H., Barth, J., Cook, M., Guo, X., Zhou, J., 2018. Origins of carbonate spherulites: implications for Brazilian Aptian pre-salt reservoir. *Sedimentary Geology* 365, 21–33.
- Coffey, J.M., Flannery, D.T., Walter, M.R., George, S.C., 2012. Sedimentology, stratigraphy and geochemistry of a stromatolite facies in the 2.72 Ga Tumbiana Formation, Fortescue Group, Western Australia. *Precambrian Research* 236, 282–296.

- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T., Perinotto, J.A.J., Assine, M.L., 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araípe Basin): sedimentary archive of the Early Cretaceous marine incursion in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology* 359, 1–15.
- Dias-Brito, D., Tibana, P., Assine, M., Rossetti, D., 2015. Laminites lacustres organo-calcários neopaleozóicos em ostracodites no Nordeste do Brasil: bacias do Araripe, Potiguar e Parnaíba. Aptiano superior (Alagoas superior). In: Dias-Brito, D., Tibana, P. (Eds.), *Calcários do Cretáceo do Brasil: um Atlas*. UNESP/UNESPetro, Rio Claro, pp. 49–119.
- Dupraz, C., Patisina, R., Verrecchia, E.P., 2006. Translation of energy into morphology: simulation of stromatolite morphospace using a stochastic model. *Sedimentary Geology* 185, 185–203.
- Dupraz, C., Reid, R.P., Braissant, O., Decho, A.W., Norman, R.S., Visscher, P.T., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews* 96, 131–162.
- Fabín, C.E., Correia Filho, O.J., Alencar, M.L., Barbosa, J.A., Miranda, T.S., Neumann, V.H., Gomes, I.F., Santana, F.R., 2018. Stratigraphic relations of the Ipubi formation: siliciclastic-evaporitic succession of the Araripe Basin. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 1–23.
- Fairchild, T.R., Sanchez, E.A.M., 2015. Microbialites no Brasil: panorâmica de ocorrências e guia de caracterização morfológica. In: Fairchild, T.R., Rohn, R., Dias-Brito, D. (Eds.), *Microbialites Do Brasil Do Pré-Cambriano Ao Recente: Um Atlas*. UNESP-IGCE-UNESPetro, Rio Claro, pp. 23–41.
- Fara, E., Saraiva, A.A.F., Campos, D.A., Moreira, J.K.R., Siebra, D.C., Kellner, A.W.A., 2005. Controlled excavations in the Romualdo Member of the Santana Formation (Early Cretaceous, Araripe Basin, northeastern Brazil): stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 218, 135–160.
- Feldmann, M., McKenzie, J.A., 1998. Stromatolite-thrombolite associations in a modern environment, Lee Stocking Island, Bahamas. *Palaios* 12, 201–211.
- Fürsich, F.T., Oeschmann, W., 1993. Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of Kachchh, western India. *J. Geol. Soc.* 150, 169–185.
- Fürsich, F.T., Custódio, M.A., Matos, S.A., Hethke, M., Quaglio, F., Warren, L.V., Assine, M.L., Simões, M.G., 2019. Analysis of a Cretaceous (late Aptian) high-stress ecosystem: the Romualdo Formation of the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Cretaceous Research* 95, 268–296.
- Gerdes, G., Claes, M., Dunajtschik-Piewak, K., Riege, H., Krumben, W.E., Reineck, H.E., 1993. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures. *Facies* 29, 61–74.
- Grey, K., 1989. Handbook for the study of stromatolites and associated structures. *Stromatolite Newsletter* 13, 82–171.
- Heimhofer, U., Ariztegui, D., Lenniger, M., Hesselbo, S.P., Martill, D.M., Rios-Netto, A.M., 2010. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, Northeastern Brazil). *Sedimentology* 57, 677–694.
- Hofmann, H., 1969. Attributes of stromatolites. *Geological Survey of Canada Papers* 69–39, 58.
- Iniesto, M., Lopez-Archilla, A.I., Frenegal-Martinez, M., Buscalion, A.D., Guerrero, M.C., 2013. Involvement of microbial mats in delayed decay: an experimental essay on fish preservation. *Palaios* 28, 56–66.
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2011. Significance of subtidal microbial deposits in Shark Bay, Australia. *Marine Geology* 286, 106–111.
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2012. Characteristics, distribution and morphogenesis of subtidal microbial systems in Shark Bay, Australia. *Marine Geology* 303–306, 115–126.
- Jahnert, R.J., Collins, L.B., 2013. Controls on microbial activity and tidal flow evolution in Shark Bay, Western Australia. *Sedimentology* 60, 1071–1099.
- Jahnert, R.J., Osni, P., Collins, L., Strobach, E., Pevzner, R., 2012. Evolution of a coquina barrier in Shark Bay, Australia by GPR imaging: Architecture of a Holocene reservoir analog. *Sedimentary Geology* 281, 59–74.
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T., Aigner, T., 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios* 1, 228–238.
- Lanés, S., Palma, R.M., 1998. Environmental implications of oncoids and associated sediments from the Remoredo Formation (Lower Jurassic) Mendoza, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (130), 357–366.
- Lokier, S.W., Court, W.M., Onuma, T., Paul, A., 2018. Implications of sea-level rise in a modern carbonate ramp setting. *Geomorphology* 304, 64–73.
- Maisey, J.H., 1991. Santana Fossils: An Illustrated Atlas. T.F.G. Publications (459 p.).
- Manso, C.L.C., Hessel, M.H., 2007. Revisão sistemática de Pygidiolampas arapinesis (Beurlen, 1966), Echinodermata (Cassiduloidea) da Bacia do Araripe nordeste do Brasil. São Paulo, UNESP, *Geociências* 26, 271–277.
- Martill, D.M., 2007. The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of northeast Brazil: a historical review and an appraisal of the biochronostratigraphic utility of its palaeobiota. *Cretaceous Research* 28, 895–920.
- Martill, D.M., Wilby, P.R., 1993. Stratigraphy. In: Martill, D.M. (Ed.), *Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil*. Field Guides to Fossils. 5. The Palaeontological Association, London, pp. 20–50.
- Martill, D.M., Bechly, G., Loveridge, R.F., 2007. The Crato Fossil Beds of Brazil: Window into an Ancient World. Cambridge University Press, p. 625p.
- Matos, R.M.D., 1992. The Northeast Brazilian rift system. *Tectonics* 11, 766–791.
- Mercedes-Martín, R., Rogerson, M.R., Brasier, A.T., Vonhof, H.B., Prior, T.J., Fellows, S.M., Reijmer, J.J.G., Billing, I., Pedley, H.M., 2016. Growing spherulitic calcite grains in saline, hyperalkaline lakes: experimental evaluation of the effects of Mg-clays and organic acids. *Sediment. Geol.* 335, 93–102.
- Merletti, G.D., Steel, R.J., Olariu, C., Melick, J.J., Armitage, P.J., Shabro, V., 2018. The last big marine transgression of the Western Interior Seaway: Almond Formation development from barrier spits across south Wyoming. *Marine and Petroleum Geology* 98, 763–782.
- Neumann, V.H., Assine, M.L., 2015. Stratigraphic Proposal to the Post-Rift I Tectonic-Sedimentary Sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Strati 2015 – 2nd International Congress on Stratigraphy*. Berichte des Institutes für Erdwissenschaften der Universität Graz, p. 274.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., Almeida, J.A.C., 2015. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano-Albiano, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais* 10, 231–246.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., 2016. Cassiopiidae gastropods, influence of Tethys Sea of the Romualdo Formation (Aptian-Albian), Araripe Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 70, 211–223.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., 2017. Paleocologia e paleogeografia dos moluscos e equinoides da Formação Romualdo, Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências-UF RJ* 40, 180–198.
- Petroff, A.P., Sim, M.S., Maslov, A., Krupenin, M., Rothman, D.H., Bosak, T., 2010. Biophysical basis for the geometry of conical stromatolites. *PNAS* 107, 9956–9961.
- Prado, L.A.C., Pereira, P.A., Sales, A.M.F., Barreto, A.M.F., 2015. Taphonomic and paleoenvironmental considerations for the concentrations of macroinvertebrate fossils in the Romualdo Member, Santana Formation, Late Aptian-Early Albian, Araripe Basin, Araripe, NE, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 62, 218–228.
- Preiss, W., 1972. The systematics of South Australian Precambrian and Cambrian stromatolites. *Transactions of the Royal Society of South Australia* 96, 67–100.
- Reid, R.P., Visscher, P.T., Decho, A.W., Stolz, J.F., Bebout, B.M., Dupraz, C., Macintyre, I.G., Paerl, H.W., Pinckney, J.L., Prufet-Bebout, L., Stepe, T.F., DesMarais, D.J., 2000. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. *Letters to Nature* 406, 989–992.
- Reid, R.P., James, N.P., Macintyre, I.G., Dupraz, C.P., Burne, R.V., 2003. Shark Bay stromatolites: microfabrics and reinterpretation of origins. *Facies* 49, 299–324.
- Reid, R.P., Foster, J.S., Radtke, G., Golubic, S., 2011. Modern marine stromatolites of Little Darby Island, Exuma Archipelago, Bahamas: environmental setting, accretion mechanism and role of euendoliths. In: Reitner, et al. (Eds.), *Advances in Stromatolite Geobiology*. Lecture Notes in Earth Sciences 131, pp. 77–89.
- Reitner, J., 1993. Modern cryptic microbialite/metazoan facies from Lizard Island (Great Barrier Reef, Australia) formation and concepts. *Facies* 29, 3–40.
- Ricardi-Branco, F., Callo, F., Cataldo, R.A., Noffke, N., Pessenda, L.C.R., Vidal, A.C., Branco, F.C., 2018. Microbial facies and the influence of metazoans in Holocene deposits of the Lagoa Salgada, Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Sedimentary Research* 88, 1200–1217.
- Riding, R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology* 47, 179–213.
- Riding, R., 2006. Microbial carbonate abundance compared with fluctuations in metazoan diversity over geological time. *Sedimentary Geology* 185, 229–238.
- Sales, A.M.F., 2005. Análise tafonômica das ocorrências fossilíferas de macroinvertebrados do Membro Romualdo (Albiano) da Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil: significado estratigráfico e paleoambiental. (Ph.D. Dissertation). Institute of Geosciences, University of São Paulo, São Paulo (160 p.).
- Shapiro, R.S., 2000. A comment on the systematic confusion of thrombolites. *Palaios* 15, 166–169.
- Spadafora, A., Perri, E., McKenzie, J.A., Vasconcelos, C., 2010. Microbial biomineralization processes forming modern Ca:Mg carbonate stromatolites. *Sedimentology* 57, 27–40.
- Srivastava, N.K., 1996. Cretaceous continental stromatolites from the Araripe Basin, Northeast Brazil. IGCP Project 381: South Atlantic Mesozoic Correlations 413–419.
- Theisen, C.H., Sumner, D.Y., 2016. Thrombolite fabrics and origins: Influences of diverse microbial and metazoan processes on Cambrian thrombolite variability in the Great Basin, California and Nevada. *Sedimentology* 63, 2217–2252.
- Valença, L.M.M., Neumann, V.H., Mabessone, J.M., 2003. An overview on Callovian-Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geol. Acta* 1, 261–275.
- Visscher, P.T., Reid, R.P., Bebout, B.M., 2000. Microscale observations of sulfate reduction: correlation of microbial activity with lithified micritic lamina in modern marine stromatolites. *Geology* 28, 919–922.
- Walter, M.R., 1972. Stromatolites and the biostratigraphy of the Australian Precambrian and Cambrian. *Spec. Pap. Palaeontol.* 11, 1–256.
- Warren, L.V., Varejão, F.G., Quaglio, F., Simões, M.G., Fürsich, F.T., Poiré, D.G., Catto, B., Assine, M.L., 2017. Stromatolites from the Aptian Crato Formation, a hypersaline lake system in the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Facies* 63, 3.