

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a) o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 23/02/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências - Campus de Bauru

Silvio Cesar Marqui Limeira Junior

**A influência dos fatores intrínsecos à concha na fidelidade ecológica de
Caenogastropoda da enseada de Ubatuba, São Paulo**

Bauru
2024

Silvio Cesar Marqui Limeira Junior

**A influência dos fatores intrínsecos à concha na fidelidade ecológica de
Caenogastropoda da enseada de Ubatuba, São Paulo**

Documento de Defesa de Mestrado
apresentada à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Ciências, Bauru, para obtenção do
título de Mestre em Biociências (Área
de Concentração: Caracterização da
Diversidade Biológica)

Orientador: Prof. Dr. Renato Pirani
Ghilardi

Bolsista: Fundação de Amparo à
Pesquisa do Estado de São Paulo
(2022/07461-2)

Bauru

2024

L733i

Limeira Junior, Silvio Cesar Marqui

A influência dos fatores intrínsecos à concha na fidelidade ecológica de Caenogastropoda da enseada de Ubatuba, São Paulo / Silvio Cesar Marqui Limeira Junior. -- Bauru, 2024
138 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru
Orientador: Renato Pirani Ghilardi

1. Tafonomia. 2. Fidelidade ecológica. 3. Gastropoda. 4. Microestrutura de concha. 5. Potencial de preservação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE SILVIO CESAR MARQUI LIMEIRA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCIÊNCIAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de fevereiro do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de SILVIO CESAR MARQUI LIMEIRA JUNIOR, intitulada **A influência dos fatores intrínsecos à concha na fidelidade ecológica de Caenogastropoda em associações mortas da enseada de Ubatuba, São Paulo**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RENATO PIRANI GHILARDI (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Ciências Biológicas / Faculdade de Ciências - Unesp/Câmpus de Bauru, Profa. Dra. SABRINA COELHO RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) FACIP / Universidade Federal de Uberlândia/ Câmpus Ituiutaba, Prof. Dr. MATIAS DO NASCIMENTO RITTER (Participação Virtual) do(a) Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ Câmpus de Imbé. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. RENATO PIRANI GHILARDI

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições que colaboraram para que este manuscrito pudesse ser concluído:

Ao Professor Dr. Renato Pirani Ghilardi, pela orientação. Os momentos de discussão conceitual e de debates filosóficos, mediados a café, muito contribuíram com minha formação;

Aos amigos Juliana Nemezio de Almeida, Hulder Henrique Zaparoli, Daniela Gomes Bernal, Henrique Bazzo Martins, Mateus Bocate Franco, Poliany Camargo, Ana Laura Dangió, Matheus Parmegiani, Débora Eliza Baumann, Felipe Nascimento Sousa, Victor Rodrigues Ribeiro e Paulo Henrique Kanno, pelo companheirismo, respeito e incentivo. Aos tutorados e amigos Beatriz Sakamoto, Gabriel Ferreira Silvério e Sabrina Maceio Trentin Nogueira pela ajuda e dedicação com a limpeza das amostras. Sem vocês, o trabalho teria sido muito mais penoso. À Maria Emília Meyer Kono, minha companheira, pelo carinho e encorajamento. Aos meus pais, Silvio Cesar Marqui Limeira e Juliana Rodrigues dos Santos Limeira, pelo suporte;

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e ao Laboratório de Materiais Avançados (ambos Depto. de Física e Meteorologia, FC-UNESP), minha sincera gratidão por permitir utilizar os equipamentos;

Ao Laboratório de Biologia de Camarões Marinhos e de Água Doce (Labcam), em especial a Dra. Júlia Fernandes Perroca, por cordialmente ceder as amostras de Caenogastropoda;

Por fim, à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, ao Programa de Pós-Graduação em Biociências, ao Departamento de Ciências Biológicas e ao Departamento de Física e Meteorologia, pela infraestrutura e pelo ensino.

AGRADECIMENTO AGÊNCIA DE FOMENTO

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de mestrado, processo nº 2022/07461-2.

RESUMO

A concha dos moluscos consiste em um biocompósito organo-mineral formado por carbonato de cálcio e uma matriz polimérica orgânica. O material congrega as propriedades de ambas as componentes, assim a valva detém a dureza das cerâmicas de carbonato e certa flexibilidade oriunda da matriz orgânica. O entendimento dessa estrutura, sob a óptica da paleontologia, fornece subsídios para identificar quais esqueletos são mais resistentes à degradação pelo ambiente de morte e, portanto, mais propensos a se preservarem no registro fóssilífero. Neste manuscrito buscou-se verificar como as características intrínsecas às conchas influenciam a fidelidade ecológica de Caenogastropoda oriundos da enseada de Ubatuba (SP, Brasil). As amostras foram coletadas em quatro pontos compreendidos no intervalo batimétrico de 5 a 15 m. A identificação taxonômica foi conduzida com base em atributos morfológicos da concha. Para estimar a biodiversidade, realizou-se análise estatística utilizando o número total de conchas por ponto de coleta, a abundância relativa e a riqueza de espécies, bem como o índice de Shannon. A fidelidade foi baseada nas porcentagens relativas de espécies entre a assembleia viva e morta e a similaridade entre elas foi aferida pelo índice de Sørensen. A mineralogia e conformação microestrutural das conchas, foram obtidas por meio das análises de Difractometria de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Adicionalmente, experimentos-controle de dissolução foram conduzidos em laboratório para comparar com a fidelidade observada no ambiente de Ubatuba. Neste caso, conchas do acervo atualístico do Laboratório de Paleontologia Macroinvertebrados (LAPALMA) foram utilizadas no experimento. Medidas morfométricas foram conduzidas e cada valva foi submetida à solução de ácido acético glacial diluído em água destilada, permanecendo por 24 h. À cada intervalo de quatro e oito horas, as amostras foram secas, pesadas, e o pH de cada recipiente foi aferido. Como resultado, observou-se que a fidelidade dos Caenogastropoda de Ubatuba apresenta comportamento sazonal. Em momentos de estabilidade pluvial/fluvia, a quantidade de indivíduos mortos foi baixa e a fidelidade não foi observada. Enquanto que, em momentos de intensa turbidez e subsequente morte dos gastrópodes, a taxa de indivíduos mortos aumentou e a fidelidade tornou-se alta. A partir das análises de DRX e MEV, observou-se que os Caenogastropoda apresentam concha aragonítica de microestrutura lamelar cruzada, distribuídas entre uma e três camadas. Para os experimentos de dissolução reconheceu-se que as amostras com taxas de perda de massa mais baixas, isto é, mais resistentes às condições químicas simuladas, são aquelas que distribuem a massa da concha ao longo de uma área superficial menor. Dessa forma, dentro do escopo deste trabalho, o potencial de preservação de Caenogastropoda, um grupo com alta diversidade morfológica e baixa diversidade microestrutural, é mais influenciado pelas características morfológicas do que microestruturais.

Palavras-chave: tafonomia, Caenogastropoda, potencial de preservação, fidelidade ecológica, microestruturas de concha.

ABSTRACT

Mollusc shells consist of an organo-mineral biocomposite made up of calcium carbonate and an organic polymer matrix. The material combines the properties of both components, so the shell has the hardness of carbonate ceramics and a certain flexibility from the organic matrix. Understanding this structure from the point of view of paleontology provides information on which skeletons are more resistant to degradation by the environment in which they died and are therefore more likely to be preserved in the fossil record. This manuscript sought to verify how the intrinsic characteristics of shells influence the ecological fidelity of Caenogastropoda from the Ubatuba bay (SP, Brazil). Samples were collected at four points within a bathymetric range of 5 to 15 m. Taxonomic identification was based on morphological attributes of the shell. To estimate biodiversity, statistical analysis was carried out using the total number of shells per collection point, relative abundance and species richness, as well as the Shannon index. Fidelity was based on the relative percentages of species between the living and dead assemblages and similarity between them was measured using the Sørensen index. The mineralogy and microstructural conformation of the shells were analyzed using X-ray diffractometry (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). In addition, dissolution control experiments were carried out in the laboratory to compare with the fidelity observed in the Ubatuba environment. In this case, shells from the present-day collection of the Laboratório de Paleontologia Macroinvertebrados (LAPALMA) were used in the experiment. Morphometric measurements were taken and each valve was subjected to a solution of glacial acetic acid diluted in distilled water for 24 hours. Every four and eight hours, the samples were dried, weighed and the pH of each container was measured. As a result, it was observed that the fidelity of the Caenogastropoda of Ubatuba shows seasonal behavior. At times of rainfall/river stability, the number of dead individuals was low and fidelity was not observed. At times of intense turbidity and subsequent death of the gastropods, the rate of dead individuals increased and fidelity became high. From the XRD and SEM analyses, it was observed that the Caenogastropoda have an aragonitic shell with a cross-lamellar microstructure, distributed between one and three layers. For the dissolution experiments, it was recognized that the samples with the lowest mass loss rates, i.e. the most resistant to the simulated chemical conditions, are those that distribute the shell mass over a smaller surface area. Thus, within the scope of this work, the preservation potential of Caenogastropoda, a group with high morphological diversity and low microstructural diversity, is influenced more by morphological than microstructural characteristics.

Keywords: taphonomy, Caenogastropoda, preservation potential, ecological fidelity, shell microstructures.

LISTA DE FIGURAS

Figure 1.1. Map of Ubatuba Bay showing sampling sites P1, P2, P3 and P4.....	27
Figure 1.2. A) Species richness rarefaction curve using 95% confidence interval. Red represents the dead assemblage and black the live assemblage; Bloxplots of B) Abundance and C) Richness, vertical bar is the median line, boxes indicate interquartile range (25-75%), whiskers indicate confidence values between 10-90% and dots are outliers.....	29
Figure 1.3. Taxa abundance in the live and dead assemblages for each sampling site. The dashed line represents the hypothetically ideal fidelity, and the solid line represents the regression line of the points.....	31
Figure 1.4. Species abundance and richness from July 2021 to June 2022 for each sampling site.....	32
Figure 1.5. F1, F2 and S indices from July 2021 to June 2022 for each sampling site. Hatched bars represent collections with less than 5 samples in LA, DA, or both.....	33
Figure 1.6. Comparison of average monthly precipitation from 2010-2022 and average monthly river flow from 1971-1978 (Source: DAEE, 2022) to DA abundance at point P4.....	39
Figure 2.1. Sampling sites of gastropod specimens in the Ubatuba Bay, SP, Brazil.....	54
Figure 2.2. Morphometric protocol. AL, aperture length; AW, aperture width; BWL, length of the body whorl; SL, spire length; SW, spire width; TL, total length; TW, total width; $\overline{TW}$ total shell width perpendicular to TW.....	56
Figure 2.3. Acetic acid solution pH throughout the 24 h experiment.....	59
Figure 2.4. Mass loss as a function of time for <i>Semicassis granulata</i> . At the end of each curve, the initial mass of the respective sample. A) In grams per hour; B) In percentage per hour.....	60
Figure 2.5. Mass loss as a function of time for Caenogastropoda. A) In grams per hour; B) In percentage per hour.....	64
Figure 2.6. Caenogastropoda shells showing taphonomic degradation throughout the experiment. A) <i>S. granulata</i> , B) <i>M. parthenopeum</i> , C) <i>T. galea</i> , and D) <i>S. pugilis</i> . Scale bar 1.0 cm.....	66

Figure 2.7. Caenogastropoda shells showing taphonomic degradation throughout the experiment. A) <i>M. verrucosus</i> ; B) <i>S. brasiliensis</i> ; C) <i>B. cochlidium</i> , and D) <i>O. urceus</i> . Scale bar 1.0 cm.....	67
Figure 2.8. Cretacean Caenogastropoda occurrence numbers as a function of mass loss rate per hour.....	69
Figure 3.1. Micrographs with examples of each group of molluscan microstructure: a) prismatic, b) spherulitic, c) laminar (Carter, 1980), d) crossed (Osuna-Mascaró et al., 2014), e) spicules or isolated spots, and f) morphotypes of isolated crystals (Carter, 1980).....	84
Figure 3.2. (a) Schematic representation of the hierarchical orders (Pokroy and Zolotoyabko, 2003), and (b) base axes (Watabe, 1988) of the cross-lamellar microstructure.....	87
Figure 3.3. Sample of <i>Olivancillaria urceus</i> . Scale bar 1.0 cm.....	89
Figure 3.4. Sampling site at Ubatuba Bay, S.....	90
Figure 3.5. Cut diagram of the shell section for visualization of the lamellae layers (adapted from Tursch and Machbaete, 1995).....	91
Figure 3.6. Diffractogram for the <i>Olivancillaria urceus</i> sample. A represents the aragonite phase and C the calcite phase.....	94
Figure 3.7. Transmittance spectrum obtained in FTIR-ATR for the sample of <i>Olivancillaria urceus</i>	95
Figure 3.8. Micrographs of the lip fracture face of <i>Olivancillaria urceus</i> after chemical corrosion for 20 min in 4% acetic acid solution. E: external layer; L: lamellar cross layer; and T: transition zone.....	97
Figure 3.9. Micrographs of the apex fracture face of <i>Olivancillaria urceus</i> after chemical corrosion for 20 min in 4% acetic acid solution. E: external transition zone; L: lamellar cross layer; and T: transition zone.....	98
Figure 3.10. Diagram for obtaining the angle between 2nd order lamellae in micrographs of the lip plane of <i>Olivancillaria urceus</i> after chemical corrosion for 20 min in 4% acetic acid solution.....	100
Figure 3.11. pH versus time graph.....	102
Figure 3.12. Effect of dissolution on the cross-lamellar microstructure of <i>Olivancillaria urceus</i> along the temporal gradient.....	103
Figura 4.1. Mapa da baía de Ubatuba com os sítios de coleta P1, P2, P3 e P4.....	115

Figura 4.2. A) Protocolo morfométrico, onde TL é comprimento total, TW é largura total, $\overline{TW}$ é a largura perpendicular à TW, AL é comprimento abertura e AW é largura abertura. B) Diagrama de corte para visualização das microestruturas da concha. Eixo L representa a direção do plano de corte longitudinal e o eixo T a direção do plano de corte transversal. A face padronizada para análise em MEV encontra-se em L.....	118
Figura 4.3. Distribuição dos Caenogastropoda em relação a área superficial da concha e a área de abertura.....	121
Figura 4.4. Micrografias das amostras de Caenogastropoda exibindo microestrutura lamelar cruzada. A) <i>B. cochlidium</i> , B) <i>B. monilifer</i> , C) <i>S. senegalensis</i> , D) <i>S. brasiliensis</i> , E) <i>O. urceus</i> , F) <i>P. hepaticus</i> , G) <i>S. cayennensis</i> , H) <i>T. galea</i> , I) <i>M. parthenopeus</i> e J) <i>S. pugilis</i> . Barra de escala branca 1.0 cm e vermelha 100 μm	122
Figura 4.5. Espessura média de cada camada de concha das amostras de Caenogastropoda ordenadas em ordem crescente.....	123
Figura 4.6. Ângulo médio entre duas lamelas consecutivas da concha das amostras de Caenogastropoda.....	124
Figura 4.7. Difrátograma das amostras de Caenogastropoda exibindo estrutura cristalográfica ortorrômica (aragonita). * refere-se ao plano de (1 1 1) e $\blacklozenge$ ao de (2 0 1).....	125

LISTA DE TABELAS

Table 1.1. Total amount of Caenogastropoda shells, by sampling site and species, over the entire collection interval. L represents organisms found alive (with soft parts), and D represents organisms found dead (without soft parts). As well as H', F1, F2 and S indices to estimate LA and DA diversity.....	30
Table S. Taxonomy of the sampled gastropods.....	47
Table 2.1. Species subjected to dissolution under laboratory conditions.....	54
Table 2.2. Initial measurements of shell morphology (TL , TW , $\overline{TW}$, AL , AW and T) and mass (m_0), surface area to mass ratio (A/m_0), aperture area (Ap) and angular coefficient of the curves in Figure 2.5A at the interval 0 – 1 h (ω).....	64
Table 3.1. Vibrational mode and wave number of the carbonate functional groups for the <i>Olivancillaria urceus</i> sample.....	96
Table 3.2. Relative angle of the 2nd order lamellae and thickness of layers L1 and L2 of <i>Olivancillaria urceus</i> sample.....	101
Table 3.3. pH and temperature values throughout the experiment.....	102
Tabela 4.1. Montante total de amostras de Caenogastropoda por espécie e ponto de coleta. L representa os organismos encontrados vivos (com partes moles), D representa os organismos encontrados mortos (sem partes moles); e T representa a soma de vivos e mortos.....	120

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO.....	9
I.I. Problemática e justificativa.....	11
II. OBJETIVOS.....	13
CAPÍTULO 1.....	16
The influence of seasonality on live-dead fidelity of Caenogastropoda from the northern coast of São Paulo state, Brazil.....	16
ABSTRACT:.....	17
1.1. Introduction.....	18
1.2. Material and Methods.....	20
1.2.1. Study area.....	20
1.2.2. Collection and taxonomic identification.....	21
1.2.3. Statistical analysis.....	23
1.3. Results.....	23
1.4. Discussion.....	29
1.4.1. Live-dead comparison and shell transport.....	29
1.4.2. Influence of seasonal variation on ecological fidelity.....	31
1.4.3. Anthropogenic impact on compositional fidelity.....	32
1.5. Conclusion.....	34
1.6. Acknowledgements.....	35
1.7. References.....	35
1.8. Supplementary Material.....	41
CAPÍTULO 2.....	43
Actualistic approach to the chemical preservation potential and its influence on the Caenogastropoda biodiversity.....	43
ABSTRACT:.....	44
2.1. Introduction.....	45
2.2. Material and methods.....	48
2.2.1. Collection site and samples.....	48
2.2.2. Dissolution experiments.....	50
2.3. Results and discussion.....	53
2.3.1. General aspects of dissolution.....	53
2.3.2. Quantitative degradation profile of Caenogastropoda.....	54
2.3.3. Qualitative degradation profile of Caenogastropoda.....	60
2.3.4. Insights for biodiversity.....	63
2.4. Conclusions.....	65
2.5. Acknowledgements.....	66
2.6. References.....	67

CAPÍTULO 3.....	74
Characterization of the cross-lamellar structure of <i>Olivancillaria urceus</i> (Gastropoda: Olividae) and its dissolution pattern.....	74
ABSTRACT:.....	75
3.1. Introduction.....	76
3.1.1. Classification of shell microstructures of gastropods.....	78
3.1.2. Cross-lamellar microstructure.....	80
3.2. <i>Olivancillaria urceus</i>	83
3.3. Materials and Methods.....	84
3.3.1. Sample acquisition and preparation.....	84
3.3.2. X-ray diffraction.....	86
3.3.3. Fourier transform infrared spectroscopic.....	87
3.3.4. Scanning electron microscopy.....	87
3.3.5. Acid immersion experiment.....	88
3.4. Results and discussions.....	88
3.4.1. X-ray diffraction.....	88
3.4.2. Fourier transform infrared spectroscopic.....	90
3.4.3. Scanning electron microscopy.....	91
3.4.3.1. Shell microstructure.....	91
3.4.3.2. Dissolution of lamellae.....	96
3.5. Conclusion.....	100
3.6. Acknowledgements.....	101
3.7. References.....	101
CAPÍTULO 4.....	107
Fidelidade vivo-morto, morfologia e microestrutura de concha de Caenogastropoda da enseada de Ubatuba, São Paulo.....	107
RESUMO:.....	108
4.1. Introdução.....	109
4.2. Material e métodos.....	110
4.2.1. Coleta, identificação e fidelidade vivo-morto.....	110
4.2.2. Protocolo morfométrico.....	111
4.2.3. Protocolo de análise microestrutural e cristalográfica.....	112
4.3. Resultados.....	114
4.4. Discussão.....	120
4.4.1. Comparação vivo-morto.....	120
4.4.2. Características morfológicas e microestruturais.....	122
4.4.3. Influência dos fatores intrínsecos à concha.....	123
4.5. Conclusão.....	124
4.6. Referências.....	125
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	129
REFERÊNCIAS.....	131

I. INTRODUÇÃO

A Classe Gastropoda é a mais abundante do Filo Mollusca e constitui, aproximadamente, 80% do filo, com cerca de 40.000 a 100.000 espécies (Bieler, 1992). Acredita-se que tenha surgido em habitats marinhos do Cambriano Inferior, irradiando-se posteriormente para ambientes de água doce e terrestres. É um dos poucos grupos que se adaptaram, com sucesso, nos três tipos de ecossistema (Domaneschi; Lopes, 2005). Os gastrópodes são caracterizados pela torção da massa visceral, concha, manto e cavidade do manto com ângulo de 180° em relação ao pé e à cabeça. Na maioria dos gastrópodes, a concha apresenta formato de cone oco, enrolado à volta de um eixo central, com uma abertura na base, permitindo que o organismo se aloque em seu interior (Domaneschi; Lopes, 2005).

A concha consiste em um biocompósito organo-mineral, distribuído em camadas sobrepostas, com 95,0 - 99,9% de uma fase cerâmica de carbonato de cálcio e 0,1 - 5,0% de matriz polimérica de proteínas esclerotizadas (Hare; Abelson, 1965; Watabe, 1984, 1988). Cada camada apresenta uma única forma mineral e certos moluscos são capazes de produzir e sobrepor duas mineralogias em camadas distintas (como a ostra *Crassostrea virginica*, Stenzel, 1963). A concha é tipicamente constituída por dois polimorfos de carbonato de cálcio, aragonita e calcita, sendo o primeiro de estrutura ortorrômica e o segundo romboédrica. A vaterita, de estrutura hexagonal, também pode ocorrer, mas com menor frequência (Checa, 2018; Qiao; Feng; Li, 2007). Amorfismo foi observado nos cristais das conchas de alguns gastrópodes, porém é considerado um estágio transitório da biomineralização do compósito (Cartwright *et al.*, 2012; Checa, 2018).

Embora a matriz orgânica constitua uma pequena fração da concha, sua colaboração para as propriedades físico-químicas da estrutura e seu papel durante a biomineralização são relevantes no estudo das partes duras dos gastrópodes. Tal matriz é constituída, principalmente, por moléculas esclerotizadas, as quais são formadas por várias proteínas, polissacarídeos, lipídios e glicosaminoglicanos, dependendo do grupo taxonômico (Checa, 2018; Watabe, 1984). Quando a matriz está organizada em forma de folhas no espaço extrapalial são formados locais (sulcos ou sítios) que, na presença de íons do fluido secretado pelo manto, promovem o crescimento da fase cerâmica perpendicularmente à face das folhas. Orientando, dessa maneira, o crescimento dos cristais e formando um arranjo periódico tridimensional chamado de microestrutura (Checa, 2018).

Ao combinar a matriz orgânica e a fase cristalina é obtido um material que congrega as propriedades de ambos. A concha de gastrópode detém a dureza das cerâmicas de carbonato de cálcio e certa flexibilidade oriunda da matriz polimérica orgânica (de Paula; Silveira, 2009; Osuna-Mascaró *et al.*, 2014). Para alguns moluscos, o comportamento biomecânico resultante, em estado hidratado, é capaz de resistir a flexionamentos de forma nunca registrada em outro invertebrado (Checa; Rodríguez-Navarro; Esteban-Delgado, 2005).

A compreensão acerca das estruturas da concha é potencialmente importante nos campos da biomecânica e biomedicina (Harper; Checa; Rodríguez-Navarro, 2009), servindo de inspiração para o desenvolvimento de novos materiais biomiméticos e atraindo pesquisadores de biologia, física, química e ciência de materiais (Zlotnikov; Schoeppler, 2017). Para a paleontologia, fulcro deste trabalho, essa abordagem é capaz de responder quais

estruturas esqueléticas são mais resistentes à degradação ocorrida no ambiente de morte e, portanto, mais propensas a se preservarem no registro fóssilífero. Contribui, também, no refinamento da análise de tafofácies. Uma associação fóssil de conchas altamente degradadas, porém frágeis, pode induzir erroneamente à compreensão de que o ambiente deposicional era altamente energético, quando na verdade, tal assembleia pode ter sido mais suscetível aos agentes tafonômicos. A situação oposta é igualmente factível, ou seja, associações com valvas pouco degradadas, no entanto, resistentes aos processos de retrabalhamento, poderiam indicar deposição em ambiente pouco energético, quando na verdade, são apenas mais resistentes aos enviesamentos tafonômicos.

Desse modo, esta proposição de pesquisa busca estudar como as características intrínsecas às conchas atuam sobre a fidelidade ecológica de Caenogastropoda entre associações vivas e mortas da Enseada de Ubatuba, litoral norte do estado de São Paulo.

I.I. Problemática e justificativa

A zona tafonomicamente ativa (TAZ, *taphonomically active zone*) é o espaço físico que compreende a interface sedimento-água e a porção sedimentar imediatamente inferior em que as condições ambientais adicionam ou retiram massa dos restos esqueléticos (Horodyski *et al.*, 2017). Essas modificações recebem o nome de assinaturas tafonômicas, classificadas conforme sua origem em: (i) física: fragmentação e abrasão; (ii) química: precipitação, dissolução e descoloração; e (iii) biológica: bioerosão e incrustação (Erthal; Ritter; Kotzian, 2017; Smith; Nelson, 2003). A intensidade de cada assinatura só será reduzida

quando o material biogênico for deslocado para a zona tafonomicamente inerte em momentos de alta taxa de sedimentação. No registro fossilífero, organismos com alta concentração de danos tafonômicos pertenceram a ambientes de baixa taxa de sedimentação e vice-versa. Assim, a apuração das assinaturas tafonômicas auxilia na identificação do paleoambiente e da paleoecologia do meio (Horodyski *et al.*, 2017).

Durante a permanência na TAZ, o modo com que o esqueleto de um organismo incorpora a degradação provocada pelo ambiente, todavia, não ocorre de maneira análoga para todos os táxons. O processo é controlado pelas características intrínsecas das partes duras do molusco, com destaque para: a cristalografia da fase cerâmica e presença de magnésio (Dodd, 1967; Morse; Mucci; Millero, 1980; Walter; Morse, 1985), tipo de microestrutura (Barclay *et al.*, 2020; Currey; Taylor, 1974; Emig, 1990; Force, 1969; Gabriel, 1981; Harper, 2000; Henrich; Wefer, 1986; Lewy, 1981; Taylor; Layman, 1972), e fração de matriz polimérica entre os cristais (Alexandersson, 1979; Gabriel, 1981; Glover; Kidwell, 1993; Harper, 2000). Tais características influenciam na resistência do material à degradação pelo meio, e portanto, o potencial de preservação (Glover; Kidwell, 1993).

Neste estudo, como mencionado, pretende-se compreender como as características intrínsecas às conchas agem sobre a fidelidade ecológica de Caenogastropoda marinhos entre associações vivas e mortas da Enseada de Ubatuba, litoral norte do estado de São Paulo. Trabalhos com esse escopo são escassos no país e não há uniformidade nas abordagens de pesquisa. Destacam-se: a) Neves (2006), por seu estudo actuopaleontológico acerca do potencial de preservação de braquiópodes *Bouchardia rosea* com experimentos

de dissolução em condições simuladas; b) Ghilardi e Simões (2000), para interpretação da abundância relativa em coquinas de bivalves da formação Corumbataí; e c) Okubo (2011) no reconhecimento de microestruturas de bivalves e gastrópodes fossilizados da Bacia Potiguar para delimitação do substrato. Apesar de meritórios dentro dos respectivos escopos, nenhum dos trabalhos supracitados apresenta uma relação clara entre a fidelidade e os aspectos intrínsecos à concha em uma associação com mais de um táxon.

II. OBJETIVOS

Conforme a problemática enunciada, pretende-se verificar se as características intrínsecas às conchas (morfológicas e microestruturas) influenciam a fidelidade ecológica entre assembleia viva e morta de Caenogastropoda oriundas da enseada de Ubatuba (SP). Em minúcia, tem-se como objetivos específicos:

- i) Coletar e identificar taxonomicamente os Caenogastropoda;
- ii) Avaliar a fidelidade ecológica dos táxons comparando estatisticamente a estrutura da comunidade viva e da comunidade morta coletadas na enseada de Ubatuba;
- iii) Conduzir experimento-controle de dissolução das conchas;
- iv) Averiguar a conformação microestrutural das conchas;
- v) Comparar a fidelidade ecológica vista no ambiente e no experimento-controle com a conformação morfológica e microestrutural das conchas de Caenogastropoda.

Os objetivos destacados acima encontram-se distribuídos nos capítulos que prosseguem:

Capítulo 1: “The influence of seasonality on live-dead comparison of Caenogastropoda from the northern coast of São Paulo state, Brazil”.

Apresenta como foi realizada a coleta e a identificação taxonômica dos Caenogastropoda, bem como a análise estatística de fidelidade vivo-morto. Discutiu-se sobre a distribuição dos táxons nos pontos de coleta e os possíveis moduladores antrópicos e não antrópicos da diversidade ao longo do ano.

Capítulo 2: “Actualistic approach to the chemical preservation potential and its influence on the Caenogastropoda biodiversity”.

Uma vez que o ambiente de Ubatuba é antropogenicamente alterado, este capítulo fornece um experimento-controle, realizado em laboratório, de degradação tafonômica. As conchas foram dissolvidas em solução ácida para obter a taxa de perda massa de cada táxon e compará-la com a respectiva fidelidade vivo-morto.

Capítulo 3: “Characterization of the cross-lamellar structure of *Olivancillaria urceus* (Gastropoda: Olividae) and its dissolution pattern”

Discorre sobre análise-teste da microestrutura de concha para *Olivancillaria urceus*, um dos táxons de Caenogastropoda.

Capítulo 4: “Fidelidade vivo-morto, morfologia e microestrutura de concha de Caenogastropoda da enseada de Ubatuba, São Paulo”.

Reúne as informações apresentadas nos capítulos anteriores, apresenta as microestruturas de concha dos demais Caenogastropoda e discute as implicações dos caracteres morfológicos e microestruturais no potencial de

preservação dos táxons fazendo referência à fidelidade vivo-morto e ao experimento de dissolução.

Considerações finais

Por fim, esta seção concentra as conclusões dos capítulos supracitados e apresenta as implicações das mesmas no estudo da tafonomia atualística.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram identificadas 11 espécies de Caenogastropoda distribuídas entre as 751 amostras coletadas. A fidelidade ecológica entre as respectivas assembleias vivas e mortas, avaliada por meio do índice de similaridade de Sørensen, variou ao longo do ano. A similaridade foi alta apenas entre janeiro e abril, o que coincide com o pico de chuva e aporte fluvial na região de Ubatuba. O aumento do fluxo aquoso perturba os sedimentos da baía de Ubatuba, o que dificulta a obtenção de alimentos e expõe os organismos aos predadores. Assim, a quantidade de organismos mortos coletados durante esse intervalo foi maior que em outros períodos de coleta. A corrente de ressurgência sentido continente, vista durante o verão, possivelmente é a responsável pelo acúmulo de conchas no ponto P4 neste período. Consequentemente, a fidelidade de espécies entre LA e DA foi maior.

Os experimentos de dissolução das conchas de Caenogastropoda evidenciaram o perfil de perda de massa de cada táxon ao longo de 24 h. As conchas de *S. brasiliensis* expôs a menor taxa de perda de massa, degradando-se de modo mais constante ao longo do experimento. Enquanto a concha de *T. galea* foi a exibiu a maior taxa, configurando a amostra de maior redução percentual de massa.

A partir das análises de FTIR e DRX, observou-se que as conchas de Caenogastropoda são constituídas de carbonato de cálcio na forma mineralógica de aragonita. Com as micrografias realizadas em MEV, foram identificadas entre uma e três camadas de microestrutura lamelar cruzada, com a maioria dos táxons tendo apresentado duas. As pastilhas de *Olivancillaria urceus* que foram imersas

em solução de 4% de ácido acético glacial apresentaram perda de orientação das lamelas de 3ª ordem após 40 min e 60 min.

Ao comparar os caracteres macro e microscópicos das conchas com o experimento de dissolução realizado previamente observou-se que, em um grupo cuja diversidade morfológica é alta e a microestrutural é baixa, os caracteres morfológicos são mais determinantes na interpretação do potencial de preservação de ataque químico que os microestruturais.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDERSSON, E. T. Marine maceration of skeletal carbonates in the Skagerrak, North Sea. **Sedimentology**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 845–852, 1979.
- BARCLAY, Kristina M. *et al.* The role of gastropod shell composition and microstructure in resisting dissolution caused by ocean acidification. **Marine Environmental Research**, [s. l.], v. 162, p. 105105, 2020.
- BIELER, Rüdiger. Gastropod Phylogeny and Systematics. **Annual Review of Ecology Evolution and Systematics**, [s. l.], v. 23, p. 311–338, 1992.
- CARTWRIGHT, Julyan H. E. *et al.* Calcium Carbonate Polyamorphism and Its Role in Biomineralization: How Many Amorphous Calcium Carbonates Are There?. **Angewandte Chemie International Edition**, [s. l.], v. 51, n. 48, p. 11960–11970, 2012.
- CHECA, Antonio G. Physical and Biological Determinants of the Fabrication of Molluscan Shell Microstructures. **Frontiers in Marine Science**, [s. l.], v. 5, p. 353, 2018.
- CHECA, Antonio Gerardo; RODRÍGUEZ-NAVARRO, Alejandro B.; ESTEBAN-DELGADO, Fransico J. The nature and formation of calcitic columnar prismatic shell layers in pteriomorphian bivalves. **Biomaterials**, [s. l.], v. 26, n. 32, p. 6404–6414, 2005.
- CURREY, J. D.; TAYLOR, J. D. The mechanical behaviour of some molluscan hard tissues. **Journal of Zoology**, [s. l.], v. 173, n. 3, p. 395–406, 1974.
- DE PAULA, Silvia Maria; SILVEIRA, Marina. Studies on molluscan shells: Contributions from microscopic and analytical methods. **Micron**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 669–690, 2009.
- DODD, J. Robert. Magnesium and Strontium in Calcareous Skeletons: A Review. **Journal of Paleontology**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 1313–1329, 1967.
- DOMANESCHI, Osmar; LOPES, Sônia Godoy Bueno Carvalho. Mollusca. *In*: RUPPERT, Edward E; FOX, Richard S; BARNES, Robert D (org.). **Zoologia dos invertebrados: uma abordagem Funcional-evolutiva**. 7. ed. São Paulo: Roca, 2005. p. 323–481.
- EMIG, C. C. Examples of post-mortality alteration in Recent brachiopod shells and (paleo)ecological consequences. **Marine Biology**, [s. l.], v. 104, p. 233–238, 1990.
- ERTHAL, Fernando; RITTER, Matias Nascimento; KOTZIAN, Carla Bender. Assinaturas tafonômicas em moluscos recentes e seu significado paleoambiental. **Terrae Didactica**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 5–30, 2017.
- FORCE, L M. Calcium carbonate size distribution on the West Florida shelf and experimental studies on the microarchitectural control of skeletal breakdown. **Journal of Sedimentary Petrology**, [s. l.], v. 39, n. 3, p.

902–934, 1969.

- GABRIEL, Julie M. Differing resistance of various mollusc shell materials to simulated whelk attack. **Journal of Zoology**, [s. l.], v. 194, n. 3, p. 363–369, 1981.
- GHILARDI, Renato Pirani; SIMÕES, Marcello Guimarães. Bivalves fósseis como indicadores da dinâmica sedimentar: um estudo de casos do paleozóico superior da Bacia do Paraná, Brasil. **Acta Geologica Leopoldensia**, [s. l.], v. 23, n. 51, p. 3–20, 2000.
- GLOVER, Clare P.; KIDWELL, Susan M. Influence of Organic Matrix on the Post-Mortem Destruction of Molluscan Shells. **The Journal of Geology**, [s. l.], v. 101, n. 6, p. 729–747, 1993.
- HARE, P. E; ABELSON, P. H. Amino acid composition of some calcified proteins. In: YEAR BOOK 64 - CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON. Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington, 1965. p. 223–232. Disponível em: <http://archive.org/details/yearbookcarne64196465carn>.
- HARPER, E. M. Are calcitic layers an effective adaptation against shell dissolution in the Bivalvia?. **Journal of Zoology**, [s. l.], v. 251, p. 179–186, 2000.
- HARPER, Elizabeth M.; CHECA, Antonio G.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, Alejandro B. Organization and mode of secretion of the granular prismatic microstructure of *Entodesma navicula* (Bivalvia: Mollusca). **Acta Zoologica**, [s. l.], v. 90, n. 2, p. 132–141, 2009.
- HENRICH, Rudiger; WEFER, Gerold. Dissolution of biogenic carbonates: effects of skeletal structure. **Marine Geology**, [s. l.], v. 71, p. 341–362, 1986.
- HORODYSKI, Rodrigo Scalise *et al.* Tafofácies e a tafonomia estratigráfica em ambientes marinhos rasos. In: HORODYSKI, Rodrigo Scalise; ERTHAL, Fernando (org.). **Tafonomia: métodos, processos e aplicação**. Curitiba, Brasil: EDITORA CRV, 2017. p. 143–173.
- LEWY, Z. Maceration of calcareous skeletons. **Sedimentology**, [s. l.], v. 28, n. 6, p. 893–895, 1981.
- MORSE, John W.; MUCCI, Alfonso; MILLERO, Frank J. The solubility of calcite and aragonite in seawater of 35‰ salinity at 25°C and atmospheric pressure. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 85–94, 1980.
- NEVES, Jacqueline Peixoto. **Efeitos dos fatores intrínsecos no potencial de preservação e representatividade de *Bouchardia davidsoni*, 1850 (brachiopoda, terebratulidina): um estudo de laboratório**. 2006. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Botucatu, 2006.
- OKUBO, Juliana. Grãos em carbonatos marinhos cretácicos da Bacia Potiguar: formações Ponta do Mel e Jandaíra. **Aleph**, [s. l.], p. 94 f., 2011.

- OSUNA-MASCARÓ, Antonio *et al.* The shell organic matrix of the crossed lamellar queen conch shell (*Strombus gigas*). **Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology**, [s. l.], v. 168, p. 76–85, 2014.
- QIAO, Li; FENG, Qing-Ling; LI, Zhuo. Special Vaterite Found in Freshwater Lackluster Pearls. **Crystal Growth & Design**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 275–279, 2007.
- SMITH, Abigail M; NELSON, Campbell S. Effects of early sea-floor processes on the taphonomy of temperate shelf skeletal carbonate deposits. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 63, p. 1–31, 2003.
- STENZEL, H. B. Aragonite and Calcite as Constituents of Adult Oyster Shells. **Science**, [s. l.], 1963. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.142.3589.232>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- TAYLOR, John D.; LAYMAN, M. The mechanical properties of bivalve (Mollusca) shell structures. **Palaeontology**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 73–87, 1972.
- WALTER, Lynn M.; MORSE, John W. The dissolution kinetics of shallow marine carbonates in seawater: A laboratory study. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [s. l.], v. 49, n. 7, p. 1503–1513, 1985.
- WATABE, N. Shell. In: BEREITER-HAHN, J.; MATOLTSY, A. G.; RICHARDS, K. S. (org.). **Biology of the Integument: Invertebrates**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-51593-4>.
- WATABE, N. Shell structure. In: TRUEMAN, E. R.; CLARKE, M. R. (org.). **The Mollusca: Form and Function**. Orlando: Academic Press, 1988. v. 11, p. 69–104.
- ZLOTNIKOV, Igor; SCHOEPPLER, Vanessa. Thermodynamic Aspects of Molluscan Shell Ultrastructural Morphogenesis. **Advanced Functional Materials**, [s. l.], v. 27, n. 28, p. 1700506, 2017.