

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E
RECURSOS NATURAIS**

TESE DE DOUTORADO

**Avaliação das populações do caranguejo *Ocypode quadrata*
(Fabricius, 1787) como bioindicador de qualidade ambiental em praias
arenosas no litoral de Santa Catarina, Brasil**

JULIA GOMES DO VALE

**São Carlos - SP
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E
RECURSOS NATURAIS**

JULIA GOMES DO VALE

Estudo das populações do caranguejo *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) como bioindicador em praias arenosas no litoral de Santa Catarina, Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais

Orientador: Prof. Dr². Joaquim Olinto Branco

Coorientadora: Profa. Dra. Odete Rocha

**São Carlos – SP
2024**

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

Ao Programa de Apoio à Pós-Graduação (ProAP), código de financiamento 001 (PROAP/CAPES PPGERN), pelo financiamento da inscrição no XXXV Congresso Brasileiro de Zoologia.

Aos professores do PPGERN-UFSCar pelos ensinamentos transmitidos nas disciplinas e aos servidores da secretaria pelo apoio prestado.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela autorização e licença concedida para a realização do projeto.

Ao Laboratório de Biologia da UNIVALI-SC, pela infraestrutura disponibilizada para a realização dos procedimentos com as amostras.

Ao professor Dr. Joaquim Olinto Branco, pela orientação e pela oportunidade de escolha do projeto de pesquisa durante o mestrado e doutorado.

À professora Dr^a Odete Rocha, pelos ensinamentos em Ecologia desde 2011, durante a graduação, e pela coorientação.

Ao ex-técnico do Laboratório de Sedimentologia – UNIVALI, Sr. Gentil Silvestre, pelos ensinamentos de geologia e pelo auxílio nas amostras de areia.

Aos meus amigos de graduação e de vida — Douglas Baracho (pelos rolês modo idoso) e Beatriz Sorigotto (pelos rolês, mesmo com ponto na cabeça kkk), Ingrid Hinobu (pelas receitas e conversas), Fábio Rigolin (pelos desabafos e pelos memes modo Naja kkkk), Bruno Paganeli (pelos nossos podcasts via whatsapp) e Lucas Packer (pelas conversas infinitas) — agradeço todos eles pela amizade, momentos de estresse compartilhados sobre a vida pessoal e profissional, e por todos os bons momentos.

Ao Diego, amigo de longa data com quem pude retomar a convivência durante o doutorado. Obrigada pelo incentivo, pelas palavras amigas, pelos momentos de raiva e pelas loucuras compartilhadas nesse percurso (que não foram poucas). Agradeço também à sua companheira, Hevelyn, pelos cafés da tarde, pelos bons momentos de risadas e pela companhia dos yorkies, sempre animados.

A minha amiga de longa data, Dra. Jacqueline Mayumi Akazaki agradeço pela nossa amizade, pelas nossas conversas e conselhos acadêmicos e pessoais. Amo você, Jacquinha.

Ao amigo Matheus Guedes, obrigada pelas aulas de argola (mesmo que sem muito sucesso, risos), pela ajuda com as burocracias, pelos cafés e pelas nossas conversas diárias.

Ao Lee Balster, pelo incentivo à vida acadêmica, pela amizade, pelos bons momentos e pela ajuda com o Excel.

À querida amiga Samira, obrigada pelas nossas conversas diárias, por sempre me receber tão bem em São Carlos e por estar sempre ao meu lado nos momentos bons e ruins, tanto na vida pessoal quanto no profissional. Obrigada amigaaaaa (*risos*).

À minha cunhada, Natasha Okuma, por ter contribuído nas ilustrações desta tese e, futuramente, nos artigos, e é claro, pelos bons momentos compartilhados.

Às minhas filhinhas de quatro patas, Meg e Mia (*in memoriam*), pelos momentos de alegria e pela companhia enquanto eu escrevia a tese :).

Ao meu querido irmão, José Victor do Vale, pelo companheirismo, pela amizade e pelo apoio nos desenhos dos caranguejos e nas dúvidas sobre granulometria.

Aos meus melhores amigos e educadores, meus pais, Nazario e Eliana. Obrigada por sempre estarem presente e pelo apoio. Dedico este trabalho a vocês.

“Temos este mundo, ou nada. E temos um grande problema se não entendermos o planeta que queremos salvar”

Carl Sagan

RESUMO

O caranguejo-fantasma (gênero: *Ocypode*) é o invertebrado mais utilizado como bioindicador em praias arenosas ao redor do mundo. No entanto, a grande parte das informações sobre a biologia desse caranguejo é obtida de forma indireta, por meio da contagem e medida de tocas. Essa metodologia apresenta vieses e carece de dados essenciais sobre a dieta, crescimento, fisiologia e reprodução do organismo. Portanto, são necessários dados mais robustos para demonstrar a aplicabilidade e limitações desse caranguejo como bioindicador de praias. No Brasil, ocorre somente uma espécie de caranguejo-fantasma (*Ocypode quadrata* Fabricius, 1787), conhecido popularmente como maria-farinha. Este estudo foi realizado em praias com diferentes perfis morfodinâmicos, nos municípios de Barra Velha, Navegantes e Itajaí, localizadas no litoral do Centro Norte Catarinense. O objetivo foi fornecer informações confiáveis sobre a população de *O. quadrata* e a aplicabilidade como bioindicador. O estudo identificou que variáveis como o tamanho do grão de areia (morfologia da praia), a temperatura do ar, a intensidade do vento (condição ambiental) e o índice de urbanização (impacto humano) influenciam as respostas populacionais do caranguejo-fantasma do Atlântico. Também foram registradas variações sazonais na biomassa e tamanho corporal, que foram maiores no verão e inverno, e espaciais, com os maiores valores médios de biomassa e tamanho corporal na praia refletiva. Em relação à condição corporal, houve uma diferença sazonal, com os maiores valores médios registrados no outono em todas as três praias. No que diz respeito à alimentação, o consumo de plástico alterou a preferência alimentar de *O. quadrata*, com uma redução significativa do IAI (Importância Alimentar) em categorias alimentares como Insecta e Material Vegetal. Quanto à aplicabilidade do caranguejo como bioindicador em ambientes de praia, destacam-se dois preditores. O índice de urbanização mostrou um efeito negativo nas medidas de tocas e nas medidas corporais do caranguejo, sendo que apenas a largura da carapaça apresentou uma influência significativa. O segundo preditor foi a supressão da vegetação nas praias, que teve um efeito significativo em todas as medidas obtidas do caranguejo (densidade de tocas, medidas corporais e fisiológicas). Por fim, o plástico demonstrou uma alteração negativa na composição alimentar, embora não tenha afetado significativamente o crescimento do animal. *O. quadrata* se mostrou um bioindicador eficaz de praias, mas é fundamental considerar os fatores abordados nesse trabalho e incorporar planos de gestão costeira visando a mitigação de impactos no ecossistema de praias arenosas.

Palavras-chave: Costas arenosas. Ecossistemas vulneráveis. Impactos antropogênicos. Indicadores biológicos. Ocypodidae.

ABSTRACT

The ghost crab (genus: *Ocypode*) is the most commonly used invertebrate bioindicator on sandy beaches worldwide. However, most information on this crab's biology is obtained indirectly, primarily through the counting and measurement of burrows. This methodology has biases and lacks essential data on the organism's diet, growth, physiology, and reproduction. Therefore, more robust data are necessary to clarify both the applicability and limitations of this crab as a beach bioindicator. In Brazil, there is only one species of ghost crab (*Ocypode quadrata* Fabricius, 1787), popularly known as maria-farinha. This study was conducted on beaches with different morphodynamic profiles in the municipalities of Barra Velha, Navegantes, and Itajaí, located on the north-central coast of Santa Catarina. The aim was to provide reliable information on the *O. quadrata* population and its applicability as a bioindicator. The study found that variables such as sand grain size (beach morphology), air temperature, wind intensity (environmental condition), and urbanisation index (human impact) influence the Atlantic ghost crab's population responses. Seasonal variations in biomass and body size were recorded, with higher values in summer and winter, and spatial variations showed the highest average values of biomass and body size on the reflective beach. In terms of body condition, a seasonal difference was observed, with the highest average values recorded in autumn across all three beaches. Regarding diet, plastic ingestion altered *O. quadrata*'s food preference, with a significant reduction in the feeding index (IAi) for food categories such as Insecta and plant material. Concerning the crab's suitability as a beach bioindicator, two predictors stood out. The urbanisation index showed a negative effect on burrow and body measurements, with only carapace width showing significant influence. The second predictor was vegetation suppression on beaches, which had a significant effect on all measurements of the crab (burrow density, body, and physiological measures). Lastly, plastic negatively impacted dietary composition, though it did not significantly affect the crab's growth. *O. quadrata* proved to be an effective bioindicator for sandy beaches, but it is essential to consider the factors highlighted in this study and to incorporate coastal management plans to mitigate impacts on the sandy beach ecosystem.

Keywords: Sandy coasts. Vulnerable ecosystems. Anthropogenic impacts. Biological indicators. Ocypodidae.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1 – Área de estudo no litoral Centro-Norte do Estado de Santa Catarina, sul do Brasil (A e B). Praias arenosas amostradas: Barra Velha – BV, Navegantes – NV e Itajaí (IT).	25
Fig. 2 – Índice de urbanização em praias do sul do Brasil: Barra Velha (BV), Navegantes (NV), e Itajaí (IT). Os <i>boxplots</i> mostram a variação dos dados, com linhas verticais que indicam o intervalo total, limites da caixa que representam o quartil superior e o quartil inferior, uma linha horizontal que indica o valor mediano e um ponto que indica a média. Legenda: eixo y: índice de urbanização.	30
Fig. 3 – Análise de componentes principais (PCA) com as variáveis ambientais coletadas nas praias de Barra Velha (BV), Navegantes (NV) e Itajaí (IT). Siglas: ST – temperatura da areia; AT – temperatura do ar; WT – temperatura da água; BW – largura da areia; phi – tamanho do grão de areia; Ui – índice de urbanização.	31
Fig. 4 – Gráficos dos modelos aditivos generalizados (GAM) demonstra o efeito da variável explicativa (índice de urbanização) para os parâmetros populacionais de <i>O. quadrata</i> . As áreas sombreadas indicam o intervalo de confiança de 95%. Valores de p significativo em negrito.	33
Fig. 1 – Localização das áreas de amostragem na costa sul do Brasil (A) compreendendo Barra Velha (B-C), Navegantes (D-E) e Itajaí (F-G). A densidade de tocas ocorreu por meio da contagem de tocas de <i>O. quadrata</i> em três transectos aleatórios, com parcelas de 4m ² . iniciado na linha da maré e até a última toca observada perto das dunas/vegetação (H-I). Créditos das fotos: Bing Maps Aerial (A); J.G. do Vale (B-I).	53
Fig. 2 – Valores médios e desvio padrão da densidade de tocas por metro quadrado em relação a estação do ano (a) e as praias (b). Legenda: Barra Velha – B, Navegantes – N, Itajaí – I.	56
Fig. 3 – Os <i>boxplots</i> mostram a variação dos dados, com linhas verticais com intervalo total, limites da caixa que representam o quartil superior e o quartil inferior, uma linha horizontal que indica o valor mediano das características biológicas do caranguejo-fantasma: biomassa ('a' e 'b'), comprimento total ('c' e 'd'), largura ('e' e 'f') e fator de condição relativo - Kn ('g' e 'h') registrados para as estações do ano nas praias de Barra Velha (B), Navegantes (N) e Itajaí (I) no Sul do Brasil.	58
Fig. 4 – Modelos lineares generalizados (GLM) entre as medidas de características biológicas e a área de vegetação em praias arenosas. Legenda: Densidade de tocas (a, e, k), Biomassa (b, g, l), Comprimento da carapaça (c, h, m), Largura da carapaça (d, i, n) e Fator de condição relativo (e, j, o) de <i>Ocypode quadrata</i> nas praias de Barra Velha (B) (a – e), Navegantes (N) (f – j) e Itajaí (I) (k – o).	61
Fig. 1 – Mapa da área de estudo e locais de amostragem de espécimes de <i>Ocypode quadrata</i> em uma praia no sul do Brasil. O índice de urbanização das áreas de praia é representado pelas seguintes cores: Verde –baixo impacto, amarelo – médio impacto e vermelho – alto impacto.	79
Fig. 2 – Exemplares de microplástico e mesoplástico no estômago de <i>O. quadrata</i> . Exemplos de microfibras encontradas (a) e (b) no estômago. Fragmento de plástico macio na região da boca (c) e o mesmo material digerido no estômago (d).	83
Fig. 3 – Índice Alimentar (IAi) para o grupo com plástico e sem plástico em cada mês .	84
Fig. 4 – A correlação entre o volume de plásticos no estômago do caranguejo fantasma <i>Ocypode quadrata</i> e a biomassa (A) e o fator de condição relativo (B).	87

LISTA DE TABELAS

Tabela S1 – Índice de urbanização para as áreas de BV, NV e IT. Critérios de González et al. (2014), com pontuações de 0 a 5. O cálculo seguiu o método de Gover, utilizando a fórmula: $X = \sum ((X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}))$, onde X é a pontuação da categoria e Xmin e Xmax os valores mínimo e máximo da escala (0 a 5).	45
Tabela S2 – Modelos de Adição Generalizados (GAM) dos parâmetros populacionais de <i>O. quadrata</i> e as variáveis explicativas. Os efeitos das variáveis significativas estão em negrito	45
Tabela 1 – Resultado da análise de variância de permutação entre as praias (Barra Velha, Navegantes e Itajaí) e estações (Primavera, Verão, Outono e Inverno), com base na matriz de similaridade de Bray-Curtis para área de vegetação e tocas por metro quadrado. Legenda: df = graus de liberdade; SS = soma dos quadrados. Valores de p significativos em negrito	56
Tabela 2 – Resultado da análise de variância de permutação entre as praias (Barra Velha, Navegantes e Itajaí) e as estações (Primavera, Verão, Outono e Inverno), com base na matriz de similaridade de Bray-Curtis para biomassa, comprimento de carapaça, largura de carapaça, largura de carapaça, fator de condição considerando a largura (Kn) dos indivíduos de <i>Ocypode quadrata</i> . Legenda: df = graus de liberdade; SS = soma dos quadrados. Valores de p significativos em negrito	57
Tabela 3 – Resultados de Modelos Lineares Generalizados (GLM) testando as relações entre medidas de biomassa, comprimento e largura da carapaça, tocas médias por metro quadrado e fator de condição relativo com a área de vegetação das praias amostradas. Valores de p significativos em negrito.....	60
Tabela S1 – Valores médios e desvio padrão das variáveis ambientais registradas em Barra Velha (B), Navegantes (N) e Itajaí (I) no período de março de 2017 a fevereiro de 2018	72
Tabela S2 – Dados biológicos do <i>Ocypode quadrata</i> capturados entre março de 2017 e fevereiro de 2018 nas praias de Barra Velha, Navegantes e Itajaí. Amplitude, média, erro padrão da biomassa, comprimento, largura da carapaça e fator de condição relativo....	73
Tabela 1 – Resultados da análise de variância de permutação (PERMANOVA) para <i>Ocypode quadrata</i> com base em matrizes de similaridade de Bray-Curtis. O fator analisado foi grupos (Grupo 1: plástico ausente; Grupo 2: plástico presente). Códigos adicionais: Df, graus de liberdade; Sum of Sqs, soma dos quadrados; R ² , coeficiente de determinação; estatística F; e Pr(>F) significativo para P < 0,05.....	85
Tabela 2 – Resultados da análise SIMPER para categorias de alimentos de <i>Ocypode quadrata</i> contribuindo para a dissimilaridade entre grupos	85
Tabela S1 – O índice de urbanização da praia da Lagoa da Barra Velha, localizada no sul do Brasil, foi avaliado utilizando os critérios de González et al. (2014). Cada indicador foi pontuado em uma escala de 0 a 5. O cálculo do índice segue o método de Gover, utilizando a fórmula: $X = \sum ((X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}))$, onde X representa a pontuação para cada categoria, e Xmin e Xmax correspondem aos valores mínimo e máximo da escala, variando de 0 a 5.....	98
Tabela S2 – Frequência de ocorrência (FO) e volume (Vo) de itens alimentares encontrados em estômagos de <i>Ocypode quadrata</i> capturados na praia da Lagoa da Barra Velha, sul do Brasil. Os meses são expressos como Mar-Março, Abr-Abril, Jun-Junho, Jul-Julho, Ago-Agosto, Out-Outubro, Nov-Novembro. Legenda: UOM = matéria	

orgânica não identificada, UPM = material vegetal não identificado, N.I = não
identificado. Valores mais representativos estão em negrito 99

Tabela S3 – Modelo linear generalizado (GLM) com distribuição binomial testando
preditores de distância do rio, índice de urbanização e presença de alimentos no conteúdo
estomacal para a presença ou ausência de material plástico em *Ocypode quadrata*. O
melhor modelo foi determinado com base nas categorias do Critério de Informação de
Akaike (AIC)..... 100

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO	12
2. INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS	16
Capítulo I. Influência das variáveis geomorfológicas, ambientais e urbanização nos parâmetros populacionais de <i>Ocypode quadrata</i> em praias arenosas	19
Resumo	20
1. Introdução	21
2. Material e Métodos	24
2.1. Área de estudo	24
2.1.1. Caracterização física e urbanização da praia	25
2.2. Variáveis ambientais	26
2.3. Amostragem indireta e direta do caranguejo-fantasma.....	27
2.4. Análises de dados.....	27
3. Resultados.....	28
3.1. Caracterização ambiental, da geomorfologia e da urbanização nas praias.....	28
3.2. Variáveis biológicas	31
4. Discussão	34
5. Conclusão	37
Referências	38
Material Suplementar	45
Capítulo II. Características biológicas do caranguejo-fantasma <i>Ocypode quadrata</i> : implicações como bioindicadores em praias arenosas	48
Resumo	49
1. Introdução.....	50
2. Material e Métodos.....	52
2.1. Área de estudo	52
2.2. Procedimentos de amostragem	53
2.2.1. Variáveis ambientais	53
2.2.2. Variáveis biológicas	54
2.2.3. Biomassa, largura, comprimento e fator de condição relativo.....	54
2.3. Análise de dados	54
3. Resultados.....	55
3.1. Variáveis ambientais	55
3.2. Características biológicas do caranguejo-fantasma	56
4. Discussão	62

5. Conclusão	65
Referências	66
Material Suplementar	72
Capítulo III. Efeitos da ingestão de meso(micro)plásticos na dieta e no crescimento do caranguejo-fantasma <i>Ocypode quadrata</i> (Fabricius, 1787) em uma praia arenosa subtropical	74
Resumo	75
1. Introdução	76
2. Material e Métodos	78
2.1. Área de estudo	78
2.2. Amostragem de espécimes e biometria	79
2.3. Análise Estomacal	80
2.4. Fator de condição	80
2.5. Análise de dados	81
3. Resultados	82
3.1. Conteúdo estomacal	82
3.2. Índice Alimentar (IAi) e Análise de porcentagem de similaridade (SIMPER)	84
3.3 Biomassa (g) e fator de condição relativo (Kn)	86
3.3.1. Correlação do volume (mm ³) de plásticos com a Biomassa e o Fator de condição relativo (Kn)	86
3.4. Ocorrência de fragmentos plásticos e MPs no estômago de <i>O. quadrata</i>	87
4. Discussão	88
5. Conclusão	92
Referências	92
Material Suplementar	98
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
APÊNDICE A – Espécimes de <i>Ocypode quadrata</i> em laboratório e em campo	104
APÊNDICE B – Registro de tocas de <i>O. quadrata</i>	108
APÊNDICE C – Fotos do estômago de <i>O. quadrata</i>	111

1. APRESENTAÇÃO

O projeto, intitulado "Avaliação das populações do caranguejo *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) como bioindicador de qualidade ambiental em praias arenosas no litoral de Santa Catarina, Brasil". A tese seguiu o Regimento Interno e Normas Complementares (2015) do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de São Carlos, que exige que as publicações estejam em revistas ou periódicos nacionais com classificação entre A1, A2, B1, B2 ou B3 (Qualis/CAPES) ou com fator de impacto superior a 0,156. A estrutura da tese consiste em uma breve introdução geral, que contextualiza os principais aspectos relacionados à problemática dos ecossistemas de praias arenosas e o uso de bioindicadores. Em seguida, os três capítulos foram organizados no formato de artigos científicos, cada um com introdução, material e métodos, resultados, discussão, conclusão e referências.

O primeiro capítulo, intitulado "Influência das variáveis geomorfológicas, ambientais e urbanização nos parâmetros populacionais de *Ocypode quadrata* em praias arenosas", explora como as características físicas das praias, como o tamanho dos grãos de areia e a inclinação da praia, e fatores ambientais, como a temperatura e a intensidade do vento, influenciam parâmetros populacionais como a densidade e o diâmetro das tocas, a biomassa e a largura dos caranguejos. Embora esses fatores já sejam reconhecidos como possíveis fontes de viés em estimativas populacionais de caranguejos (Lucrezi et al., 2009; Checon et al., 2023), poucos estudos os abordam de forma adequada. Portanto, este capítulo visa esclarecer essas influências e garantir que os dados obtidos para uso do caranguejo-fantasma como bioindicador de distúrbios antrópicos sejam mais precisos e robustos.

O segundo capítulo, intitulado "Características biológicas do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata*: implicações como bioindicador em praias arenosas", explora como essa espécie é afetada por fatores temporais e espaciais. Considerando a escassez de estudos que combinam métodos diretos e indiretos para analisar a biologia do caranguejo, além da limitação de coletas que abrangem todas as estações e tipos de praias (Branco et al., 2010; do Vale et al., 2022), há uma compreensão restrita sobre os efeitos da sazonalidade e da morfodinâmica da praia sobre a espécie. Foi destacado a cautela ao utilizar dados coletados em períodos específicos do ano ou em determinados tipos de praia, uma vez que fatores intrínsecos e extrínsecos influenciam significativamente a

biologia do caranguejo. Ao testar o caranguejo como bioindicador em praias arenosas, considerando um único estressor (vegetação), todas as medidas coletadas do caranguejo atuaram como bons indicadores.

O terceiro capítulo, "Efeitos da ingestão de meso(micro)plásticos na dieta e no crescimento do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) em uma praia arenosa subtropical". Embora a interação e ingestão de plásticos por *O. quadrata* já tenha sido documentada, os efeitos diretos dessa ingestão ainda não foram estudados (Costa et al., 2019; 2023). Dado o papel ecológico do caranguejo-fantasma na bioturbação, ciclagem de nutrientes e conexão entre as teias alimentares marinha e terrestre (Lucrezi e Schlacher, 2014), este capítulo foi desenvolvido para esclarecer informações do consumo de plásticos sobre o caranguejo e as possíveis consequências para teia alimentar no ecossistema arenoso. Finalmente, uma seção de considerações finais encerra o documento, demonstrando a problemática do tema e conectando todos os resultados presentes na tese.

2. INTRODUÇÃO GERAL

Os ecossistemas costeiros têm enfrentado um efeito cumulativo de estressores que atuam de forma sinérgica, decorrente do crescimento da urbanização e industrialização, da maior exploração de recursos naturais e da crescente vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas (e.g., aumento do nível do mar e o aquecimento global) (Defeo e Elliott, 2021). Dentre os ambientes costeiros, as praias arenosas são consideradas as mais ameaçadas, em parte devido ao uso descontrolado e à ausência de políticas eficazes de gestão, o que pode estar relacionado à falta de reconhecimento das praias como ecossistemas marinhos ou terrestres (Fanini et al., 2020). Além disso, há uma percepção equivocada de que esses ambientes são sistemas homogêneos cujo único serviço ambiental é o lazer (Defeo et al., 2009). Esse cenário resulta em um ‘paradoxo do turismo ambiental’, onde o crescimento da atividade turística, embora traga benefícios econômicos, acaba comprometendo as características naturais que atraem os visitantes, levando à degradação dos próprios recursos que deveriam ser protegidos (Butler, 1980; Defeo e Elliott, 2021).

Para enfrentar esses desafios, é fundamental desenvolver estratégias de gestão que reduzam, a médio e longo prazo, as pressões sobre as costas arenosas. Para que essas intervenções sejam bem-sucedidas, duas condições precisam ser atendidas: primeiramente, os valores ambientais e os objetivos de conservação precisam ser claramente estabelecidos e amplamente divulgados para toda a sociedade (Harris et al., 2014; Vivian e Schlacher, 2015); em segundo lugar, as decisões de gestão devem ser baseadas em avaliações de impacto que forneçam informações sólidas e biologicamente relevantes (Harris et al., 2015). Essas avaliações são frequentemente conduzidas com o uso de bioindicadores, que são respostas dos organismos utilizadas para identificar a ocorrência e o impacto das mudanças ambientais sobre o ecossistema (Dale e Beyeler, 2001). As respostas podem ser mensuradas em diversos níveis de organização ecológica, desde o nível genético até o ecossistêmico (Schlacher et al., 2007). As principais características de um bioindicador são: i) fornecer alertas rápidos sobre problemas ambientais, antes que suas consequências sejam percebidas pela população; ii) ajudar a identificar a relação entre os agentes estressores e as respostas biológicas; iii) oferecer uma visão integrada das respostas dos organismos às mudanças ambientais; e iv) permitir a avaliação da eficácia das medidas mitigadoras adotadas para resolver os impactos causados pelas atividades humanas (Vos et al., 1985).

Nesse contexto, os organismos bentônicos são reconhecidos como indicadores de qualidade de ambiente e são frequentemente utilizados para verificar os efeitos de estressores humanos em praias arenosas (Costa et al., 2020). Entre os bioindicadores mais representativos estão os organismos da família Ocypodinae, distribuídos globalmente, desde regiões tropicais até latitudes temperadas (Sakai e Türkay 2013). Popularmente conhecido como caranguejo-fantasma, o nome se deve à cor pálida e ao movimento rápido, que cria uma imagem semelhante a um fantasma (Cott 1929; Pearse et al., 1942). No Brasil, esse caranguejo é comumente chamado de maria-farinha (Branco et al., 2010), mas também é conhecido como guaruça, vaza-maré e siripidoca (Santos, 1982; Sawaya, 1939). Esse invertebrado é o mais conspicuo das praias arenosas, tanto pelo tamanho corporal quanto pelas tocas proeminentes que constrói ao longo da praia (Lucrezi e Schlacher, 2014). Essas tocas oferecem uma fonte indireta de dados populacionais, permitindo a estimativa de abundância e tamanho corporal por meio da contagem e medição, sem a necessidade de captura dos organismos (Barros, 2001). Portanto, a ampla adoção do caranguejo-fantasma como bioindicador deve-se, em grande parte, pelo hábito fossorial e à vasta distribuição geográfica (Lucrezi et al., 2009; Lucrezi e Schlacher, 2014; Schlacher et al., 2016; Checon et al., 2023).

Embora a amostragem indireta reduza os custos e os esforços envolvidos, possibilitando avaliações mais rápidas, com maior cobertura de áreas e número de réplicas (Pombo e Turra, 2019), essa abordagem apresenta vieses de superestimação e subestimação da população do caranguejo-fantasma (Silva e Calado, 2013). Além disso, os estudos que utilizam métodos de avaliação direta (Branco et al., 2020; do Vale et al., 2022), como a captura dos animais, ainda são menos frequentes quando comparados aos métodos indiretos, o que gera lacunas significativas no conhecimento sobre a biologia desse organismo. Portanto, o uso do caranguejo-fantasma como bioindicador em praias arenosas pode resultar em interpretações equivocadas. Para que as respostas aos estressores ambientais sejam corretamente registradas e compreendidas, é fundamental compreender a biologia do organismo (Dale e Beyeler, 2001).

Diante desse cenário, a única espécie de caranguejo-fantasma registrada no Brasil, *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787), distribuída ao longo da costa do Atlântico (Lucrezi e Schlacher, 2014), foi o foco deste estudo. A pesquisa forneceu informações sobre a biologia populacional da espécie com base em métodos indiretos e diretos, demonstrando como fatores endógenos, ambientais e características físicas das praias influenciam o

caranguejo-fantasma do Atlântico. Além disso, a espécie foi empregada como bioindicador, tanto para um estressor específico (supressão da vegetação) quanto para múltiplos estressores humanos (índice de urbanização). Por fim, o potencial estressor, o consumo de plástico, foi investigado, e os efeitos sobre o tamanho do indivíduo, a condição corporal e os hábitos alimentares foram caracterizadas, trazendo informações inéditas para essa espécie.

REFERÊNCIAS

- BARROS, F. Ghost crabs as a tool for rapid assessment of human impacts on exposed sandy beaches. **Biological conservation**, v. 97, n. 3, p. 399-404, 2001.
- BRANCO, Joaquim O. et al. Bioecology of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) (Crustacea: Brachyura) compared with other intertidal crabs in the southwestern Atlantic. **Journal of Shellfish Research**, v. 29, n. 2, p. 503-512, 2010.
- BUTLER, Richard W. The concept of a tourist area cycle of evolution: Implications for management of resources. **Canadian geographer**, v. 24, n. 1, p. 5-12, 1980.
- COSTA, Leonardo Lopes et al. “Microplastic ecology”: Testing the influence of ecological traits and urbanization in microplastic ingestion by sandy beach fauna. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 290, p. 108406, 2023.
- COSTA, Leonardo Lopes et al. Interaction of the Atlantic ghost crab with marine debris: Evidence from an in situ experimental approach. **Marine pollution bulletin**, v. 140, p. 603-609, 2019.
- COSTA, Leonardo Lopes et al. Macroinvertebrates as indicators of human disturbances on sandy beaches: A global review. **Ecological Indicators**, v. 118, p. 106764, 2020.
- COTT, HUGH B. Lecturer in Hygiene, University of Bristol. In: **Proceedings of the Zoological Society of London**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 1929. p. 755-765, 1929.
- CHECON, Helio H. et al. Sandy beach bioindicators: how each benthic taxon tells its own story. **Ocean & Coastal Management**, v. 240, p. 106645, 2023.
- DALE, Virginia H.; BEYELER, Suzanne C. Challenges in the development and use of ecological indicators. **Ecological indicators**, v. 1, n. 1, p. 3-10, 2001.
- DEFEO, Omar, ELLIOTT, Michael. The ‘triple whammy’ of coasts under threat—Why we should be worried!. **Marine Pollution Bulletin**, v. 163, p. 111832, 2021.
- DEFEO, Omar et al. Threats to sandy beach ecosystems: a review. **Estuarine, coastal and shelf science**, v. 81, n. 1, p. 1-12, 2009.
- DO VALE, Julia Gomes et al. Factors influencing the feeding habits of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) on subtropical sandy beaches. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 269, p. 107817, 2022.
- FABRICIUS, Johannes Christophorus. **Mantissa insectorum, sistens eorum species nuper detectas, adjectis characteribus genericis, differentiis specificis, emendationibus observationibus**. 1787.

FANINI, Lucia; DEFEO, Omar; ELLIOTT, Michael. Advances in sandy beach research—local and global perspectives. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 234, p. 106646, 2020.

HARRIS, Linda et al. Quantifying cumulative threats to sandy beach ecosystems: a tool to guide ecosystem-based management beyond coastal reserves. **Ocean & Coastal Management**, v. 110, p. 12-24, 2015.

HARRIS, Linda et al. Setting conservation targets for sandy beach ecosystems. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 150, p. 45-57, 2014.

LUCREZI, Serena; SCHLACHER, Thomas A.; WALKER, Simon. Monitoring human impacts on sandy shore ecosystems: a test of ghost crabs (*Ocypode* spp.) as biological indicators on an urban beach. **Environmental monitoring and assessment**, v. 152, p. 413-424, 2009.

LUCREZI, Serena; SCHLACHER, Thomas A. The ecology of ghost crabs. **Oceanography and Marine Biology**, p. 201-256, 2014.

MILNE, Lorus J.; MILNE, Margery J. Notes on the behavior of the ghost crab. **The American Naturalist**, v. 80, n. 792, p. 362-380, 1946.

SAKAI, Katsushi; TÜRKAY, Michael. Revision of the genus *Ocypode* with the description of a new genus, *Hoplocypode* (Crustacea: Decapoda: Brachyura). **Memoirs of the Queensland Museum**, v. 56, n. 2, p. 665-793, 2013.

SANTOS, E., 1982, O Mundo dos Artrópodes. Itatiaia Ltda, Belo Horizonte, pp. 105-179 (Coleção Zoologia Brasília, Vol. 8)

SAWAYA, P. Animais cavadores da praia arenosa. **Arquivos do Instituto Biológico (Sao Paulo)**, v. 10, p. 319-326, 1939.

SCHLACHER, Thomas A. et al. Human threats to sandy beaches: A meta-analysis of ghost crabs illustrates global anthropogenic impacts. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 169, p. 56-73, 2016.

SCHLACHER, Thomas A.; THOMPSON, Luke; PRICE, Sam. Vehicles versus conservation of invertebrates on sandy beaches: mortalities inflicted by off-road vehicles on ghost crabs. **Marine Ecology**, v. 28, n. 3, p. 354-367, 2007.

SILVA, Willian; CALADO, Tereza. Number of ghost crab burrows does not correspond to population size. **Open Life Sciences**, v. 8, n. 9, p. 843-847, 2013.

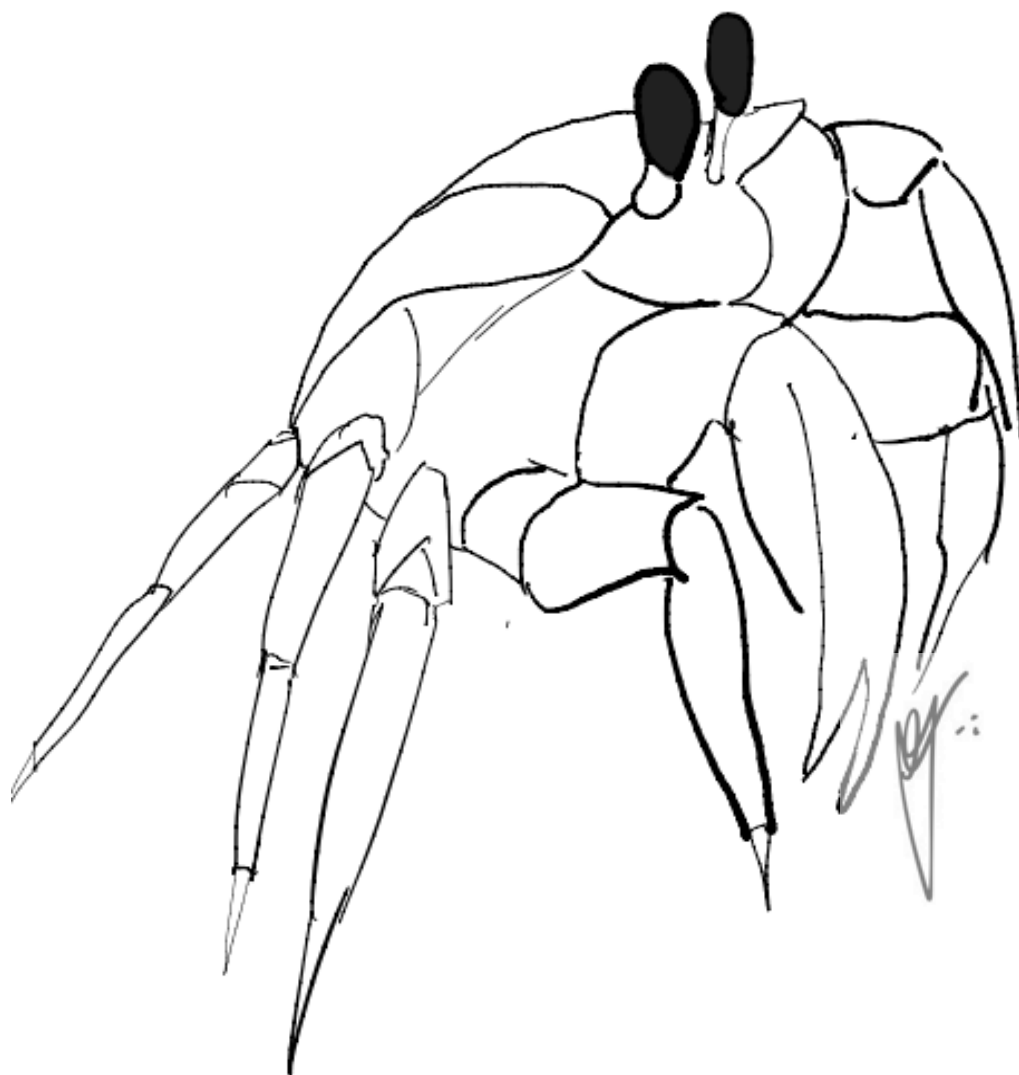
PEARSE, Arthur Sperry; HUMM, Harold Judson; WHARTON, George Willard. Ecology of sand beaches at Beaufort, NC. **Ecological Monographs**, v. 12, n. 2, p. 135-190, 1942.

POMBO, Maíra; TURRA, Alexander. The burrow resetting method, an easy and effective approach to improve indirect ghost-crab population assessments. **Ecological Indicators**, v. 104, p. 422-428, 2019.

VIVIAN, E. V. C.; SCHLACHER, T. A. Intrinsic and utilitarian valuing on K'gari-Fraser Island: a philosophical exploration of the modern disjunction between ecological and cultural valuing. **Australasian Journal of Environmental Management**, v. 22, n. 2, p. 149-162, 2015.

VOS, J.B.; FEENSTRA, J.F.; BOER, J. de.; BRAAT, L.C.; BAALLEN, J. van. **Indicators for the state of the environment**. Amsterdam: Institute for Environmental Studies, 425p, 1985.

Capítulo I. Influência das variáveis geomorfológicas, ambientais e urbanização nos parâmetros populacionais de *Ocypode quadrata* em praias arenosas



Influência das variáveis geomorfológicas, ambientais e urbanização nos parâmetros populacionais de *Ocypode quadrata* em praias arenosas

Resumo

Este estudo investigou as variações nos parâmetros populacionais do caranguejo-fantasma do Atlântico (*Ocypode quadrata*) em três praias arenosas no estado de Santa Catarina, sul do Brasil, com diferentes graus de urbanização. Para compreender como as características geomorfológicas da praia, assim como fatores ambientais e urbanos influenciam essa espécie, analisamos diversos parâmetros populacionais. A contagem de tocas (método indireto de densidade) resultou em um total de 1.012 tocas, distribuídas entre as praias de Barra Velha (BV, 400), Navegantes (NV, 326) e Itajaí (IT, 286), enquanto as capturas (método direto) totalizaram 660 caranguejos, sendo 221 em BV, 186 em NV e 253 em IT. Os Modelos Aditivos Generalizados (GAMs) mostraram que na amostragem indireta, a variação na densidade e no diâmetro das tocas foi melhor explicada pelas características geomorfológicas da praia e pelas condições ambientais. Em contrapartida a largura da carapaça e a biomassa obtidas por amostragem direta estavam mais relacionadas às condições ambientais e ao grau de urbanização. O preditor de urbanização apresentou uma relação inversa com todas as variáveis dependentes do caranguejo-fantasma, sendo significativa apenas para a largura da carapaça. Outras características geomorfológicas da praia, como grãos de areia maiores, favoreceram a densidade de tocas, enquanto a inclinação da praia teve um efeito negativo tanto na densidade quanto no diâmetro das tocas. Variáveis ambientais como a temperatura do ar e a intensidade do vento influenciaram a atividade dos caranguejos, sendo esperado que caranguejos maiores demonstrassem maior tolerância a essas condições. O estudo ressalta a importância de considerar as características geomorfológicas e ambientais das praias ao utilizar *O. quadrata* como bioindicador de distúrbios antrópicos, e recomenda a padronização de metodologias e o monitoramento cuidadoso para otimizar o uso deste organismo no gerenciamento costeiro.

Palavras-chave: Costas arenosas, Impactos antropogênicos, Crustáceos, Indicadores biológicos, Ocypodidae.

1. Introdução

O manejo e a conservação das praias constituem desafios para a gestão costeira, já que essas áreas funcionam tanto como locais de recreação e desenvolvimento urbano quanto demandam proteção para garantir a biodiversidade (Schlacher et al., 2014; Fanini et al., 2020). O aumento da população e da urbanização em direção às praias tem alterado a dinâmica das costas arenosas (Brown e McLachlan, 2002) que, por natureza, já são ambientes altamente diversos, dinâmicos e fisicamente heterogêneos. Essas regiões são moldadas principalmente pela interação das ações das ondas, regimes de marés e pela sua morfologia da praia (Barreto et al., 2018). Abrange mais de um terço do litoral global e trata-se de um ecossistema que possui alto valor socioeconômico — seja pelo turismo, pela recreação ou pelo mercado imobiliário — e oferece serviços ecossistêmicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, o armazenamento e transporte de sedimentos, a filtragem da água, a proteção costeira e o fornecimento de alimentos (Schlacher et al., 2008; Luijendijk et al., 2018).

Essas áreas têm sofrido modificações intensas devido aos múltiplos estressores provocados pela urbanização local, associados aos eventos climáticos extremos e a elevação do nível do mar. Estima-se que, até o final do século XXI, metade das praias arenosas possa desaparecer completamente (Vousdoukas et al., 2020). Além disso, os estudos ecológicos sobre a biodiversidade nesse ambiente foram negligenciados por muito tempo, resultando em uma carência de informações sobre suas particularidades (Nel et al., 2014). A consequência do uso excessivo dos recursos das costas arenosas, associado ao gerenciamento inadequado e à ausência de políticas apropriadas, tem levado à diminuição e, em alguns casos, à extinção de espécies que habitam esses ambientes (Jones et al., 2007; McLachlan e Defeo, 2018). Esses impactos ressaltam a urgência de desenvolver estratégias eficazes de manejo e conservação, uma vez que as praias arenosas abrigam espécies únicas, principalmente da macrofauna (e.g., crustáceos, moluscos e poliquetas), além de espécies transitórias, como as tartarugas marinhas, peixes e aves marinhas (Harris et al., 2014; McLachlan e Defeo, 2018).

Diante desses desafios, os estudos focados na avaliação ambiental e no monitoramento têm recebido maior atenção, com destaque para o uso de indicadores biológicos ou bioindicadores (Jonah et al., 2015; Costa et al., 2020a; Augusto et al., 2023). Esses bioindicadores refletem a resposta das espécies às pressões exercidas por impactos tanto antropogênicos quanto naturais, fornecendo métricas específicas que indicam o

estado de saúde do ecossistema (Schlacher et al., 2014). A escolha do bioindicador mais adequado deve ser guiada pelos objetivos da pesquisa, que podem abranger desde indicadores em nível gênico (Costa et al., 2021) até escalas maiores, como a paisagem (Peña-Alonso et al., 2019).

Entre os bioindicadores, os macroinvertebrados são mais utilizados em praias arenosas e destacam-se por fornecer respostas claras e previsíveis às pressões ambientais e antropogênicas (Bessa et al., 2013; Costa et al., 2022a). De acordo com a hipótese autoecológica (Noy-Meir, 1979) e os estudos ecológicos em praias arenosas, tem sido amplamente demonstrado que priorizar as respostas de espécies específicas ao ambiente é mais eficaz e gera resultados mais consistentes do que analisar toda a comunidade (Costa et al., 2020a). Ao observar o comportamento e a abundância de espécies-alvo que reagem de maneira previsível às mudanças ambientais, os resultados tornam-se mais claros e informativos. Entre os macroinvertebrados, os crustáceos da família Talitridae, Cirolanidae e Ocypodidae têm sido amplamente utilizados como indicadores de pressões humanas e eventos climáticos em praias (Machado et al., 2016; Suciú et al., 2018). Esses organismos seguem as premissas de um bom indicador: (1) são de fácil medição e baixo custo; (2) são sensíveis a estresses, com respostas previsíveis a pressões específicas; (3) apresentam resistência a fontes esperadas de interferência; (4) as reações a distúrbios naturais e antropogênicos são bem conhecidas; (5) fornece dados em escalas temporais e espaciais adequadas para a gestão; e (6) permitem prever alterações que podem ser mitigadas por ações de manejo (Dale e Beyeler, 2001; Niemeijer e de Groot, 2008).

Entre os crustáceos, o caranguejo-fantasma (família: Ocypodidae) destaca-se como o indicador mais amplamente reconhecido, devido à ampla distribuição nos trópicos (Jonah et al., 2015; de Souza et al., 2017; Ocaña et al., 2020), facilidade de amostragem de tocas e baixo custo (Barros, 2001). Esses caranguejos constroem tocas conspicuas, distribuídas em toda a extensão da praia. Isso permite inferir, por método indireto, a abundância populacional pela contagem das tocas, além de determinar o tamanho dos indivíduos pela medição da entrada das tocas (Noriega et al., 2012; Pombo e Turra, 2019). Pesquisas demonstram que o caranguejo-fantasma responde a distúrbios de pulso ou pressão, sejam de origem humana ou ambiental, e que a resposta varia conforme a escala temporal e o tipo de estressor (Lucrezi et al., 2010; Barboza et al., 2021; Costa et al., 2022). Esses estressores podem ser específicos, como o pisoteio, a supressão de vegetação, a iluminação e o atropelamento por veículos; ou associados ao conjunto de

fatores relacionados à urbanização, como a blindagem costeira, a limpeza de praia, a construção e o acúmulo de lixo na areia (Schlacher et al., 2016; Costa et al., 2020b,c). Além disso, os estressores podem resultar da interação entre urbanização e eventos climáticos como tempestades e furacões (Machado et al., 2019), modificando a dinâmica populacional da espécie.

Apesar das vantagens que o caranguejo-fantasma oferece como bioindicador em praias arenosas, a utilização também apresenta desafios metodológicos. A maior parte do conhecimento sobre a ecologia populacional é obtida pelas medidas indiretas, como a avaliação das tocas (de Oliveira et al., 2016; Schlacher et al., 2016; Ocaña e de Jesús-Navarrete, 2021), em vez de medidas diretas, por capturas dos espécimes (Branco et al., 2010; do Vale et al., 2022). Isso pode resultar em vieses de amostragem, como superestimação ou subestimação de indivíduos, visto que a presença de tocas abertas não assegura a presença do indivíduo (Pombo e Turra, 2013). Além disso, a abertura visível das tocas depende de fatores morfológicos da praia (como o tipo de sedimento), condições climáticas (como a temperatura) e impactos humanos (como o pisoteio) que podem preservá-las ou não (Pombo et al., 2017). Portanto, para utilizar corretamente um bioindicador é essencial distinguir as repostas dos organismos dos efeitos causados pelas propriedades físicas da praia, pelas variações ambientais e pelos distúrbios humanos (Checon et al. 2023).

Outro desafio metodológico é a padronização do horário de coleta. A maioria dos estudos realizam a amostragem de campo no início do crepúsculo (Lucrezi et al., 2013; Costa et al., 2020c; Tiralongo et al., 2020), pois a atividade do caranguejo-fantasma depende da temperatura e exibe padrões mais intensos durante o crepúsculo e à noite (Palmer, 1971; Weinstein, 1995; Valero-Pacheco et al., 2007). Em temperaturas do ar ambientais mais baixas (abaixo de 12°C), esses caranguejos reduzem a atividade e/ou entram em torpor (Hughes 1966; Tiralongo et al., 2020). No entanto, pesquisadores apontam que temperaturas em torno de 16°C já são suficientes para a atividade do caranguejo diminuir, resultando em um deslocamento para o período da manhã (Alberto e Fontoura, 1999; do Vale et al., 2022). Portanto, as variações no horário de atividade, juntamente com as variações da morfodinâmica da praia e nas condições ambientais devem ser cuidadosamente consideradas. A padronização dos métodos de coleta em áreas geograficamente similares pode reduzir os vieses de amostragem (Lucrezi et al., 2009). Assim, fornecer informações que consideram o efeito da morfologia da praia, das

condições ambientais e do impacto humano no caranguejo-fantasma é fundamental para distinguir quais desses fatores realmente influenciam o organismo, minimizando os vieses ao utilizá-lo como bioindicador em praias arenosas.

O presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de metodologias diretas e indiretas, as diferenças nos parâmetros populacionais do caranguejo-fantasma do Atlântico (*Ocypode quadrata*) em praias arenosas no sul do Brasil. Para isso, analisamos como os fatores geomorfológicos das praias, ambientais e o desenvolvimento urbano influenciam a população do caranguejo-fantasma, com base em três hipóteses: (i) áreas com grãos de areia maiores apresentam maior densidade de tocas e indivíduos maiores, em conformidade com a hipótese de segurança de habitat (HSH) (Defeo e McLachlan, 2011); (ii) fatores ambientais afetam a atividade de superfície dos caranguejos, favorecendo indivíduos mais adaptados a condições adversas, sendo os maiores os que apresentam maior tolerância ambiental; e (iii) em áreas mais urbanizadas, a densidade, o diâmetro das tocas e o tamanho dos indivíduos são menores, devido à deterioração da qualidade ambiental que afeta a saúde dos indivíduos.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

Este estudo foi realizado no litoral Centro-Norte do estado de Santa Catarina, Brasil (Fig. 1a,b), uma região subtropical, caracterizada por praias com diferentes morfologias (e.g., dissipativas, intermediárias e refletivas) (do Vale et al., 2022). Foram selecionadas três praias em latitudes semelhantes (26°), para reduzir a influência das condições climáticas. Os ventos predominantes nessa região sopram de sudoeste no inverno e de nordeste nas demais estações do ano (Araújo et al., 2006). A massa de água da região é composta por águas costeiras que recebem um significativo aporte de nutrientes provenientes dos rios do estado de Santa Catarina (Barrilli et al., 2024). A praia da Lagoa de Barra Velha (26°34'56.64" - 26°37'37.70" S; 48°39'55.38" - 48° 40'49.12" W), classificada como refletiva, apresenta predominantemente grãos de areia grossa, uma faixa de areia estreita com alta inclinação, e vegetação composta principalmente por arbustos e árvores de médio porte. Essa área é frequentada principalmente por pescadores e moradores locais (Fig. S1). A Praia de Navegantes (26°49'36,5" - 26°54'35.46" S; 48°37'17.36" - 48°38'34.61" W) é classificada como dissipativa, com grãos de areia finos, inclinação suave e faixa de areia extensa, com dunas cobertas por vegetação rasteira, arbustos e árvores de médio porte (Fig. S2). É utilizada por pescadores, banhistas e

turistas para lazer e recreação. A Praia Brava, em Itajaí ($26^{\circ}55'57.30''$ - $26^{\circ}57'36.02''$ S; $48^{\circ}37'35.08''$ - $48^{\circ}37'41.35''$ W) classificada como intermediária, com predomínio de grãos de areia médios, extensão de faixa de areia moderada e inclinação também moderada. A vegetação é formada por plantas rasteiras e arbustos (Fig. S3). Esta praia é muito visitada por turistas, banhistas, pescadores e moradores como área de lazer e recreação.

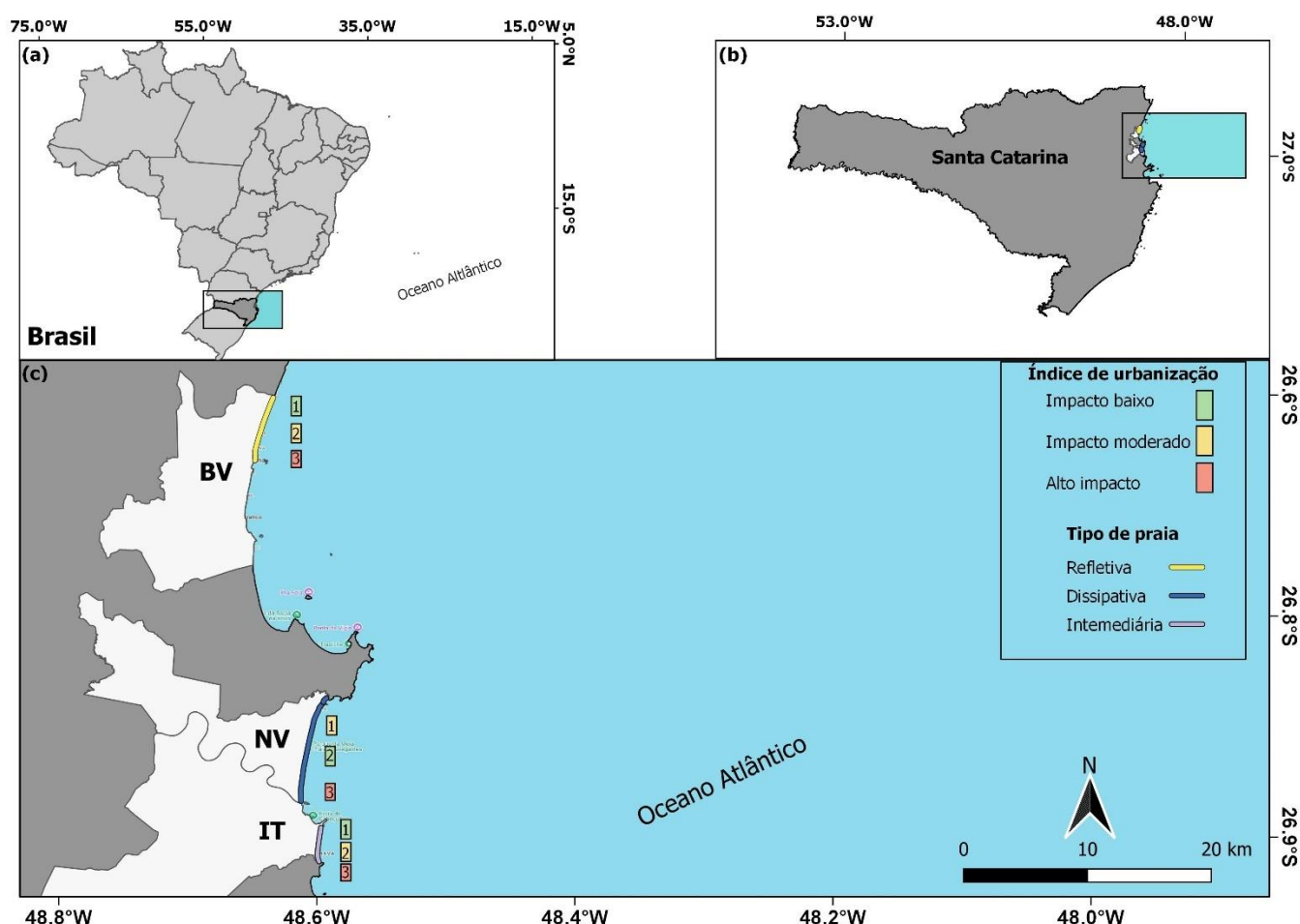


Fig. 1 – Área de estudo no litoral Centro-Norte do Estado de Santa Catarina, sul do Brasil (A e B). Praias arenosas amostradas: Barra Velha – BV, Navegantes – NV e Itajaí (IT).

2.1.1. Caracterização física e urbanização da praia

As características geomorfológicas das praias analisadas neste estudo incluíram as variáveis físicas sendo a inclinação, largura, granulometria da areia e, como perturbação, fatores antropogênicos. A inclinação da praia foi calculada utilizando o método "rise over run". Duas estacas foram colocadas na linha da costa e nas dunas frontais, e a distância perpendicular entre elas foi medida para determinar a inclinação em direção ao mar (Emery, 1961).

Para medir a largura da praia, transectos foram estabelecidos, e a distância entre a linha da maré e o final da vegetação costeira foi medida com uma trena. O sedimento foi caracterizado por análise granulométrica, utilizando 50 g de areia coletada nas três praias. No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 60 °C por 24 horas e peneiradas em uma série de peneiras padronizadas para a escala Wentworth (1922) (4,00, 2,00, 1,00, 0,500; 0,250, 0,180, 0,125 e 0,063 mm), adaptadas à escala phi (ϕ), conforme Krumbein (1934) (Fig. S4). Os parâmetros de Folk e Ward (1957) foram aplicados para análise dos dados, utilizando o software Sysgran 3 para a análise estatística (Camargo, 2005).

Para classificar a perturbação por fatores antropogênicos em Barra Velha (BV), Navegantes (NV) e Itajaí (IT), cada praia foi dividida em diferentes níveis de urbanização, como proposto por González et al. (2014). As praias foram classificadas em três níveis: impacto baixo, impacto moderado e impacto alto (Fig. 1c, tabela S1). Em cada praia, foram realizadas quatro réplicas para cada nível de urbanização, totalizando doze coletas por praia. Para avaliar o nível de urbanização, utilizamos indicadores antrópicos, como proximidades de centros urbanos, construção na praia, limpeza de praia, presença de resíduos sólidos, tráfego de veículos e frequência de visitantes. Cada indicador recebeu uma pontuação em uma escala de 0 a 5. O cálculo dos níveis de urbanização foi realizado por meio de um índice calculado segundo o método de Gover, pela fórmula:

$$X = \sum ((X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})),$$
 onde X representa a pontuação de cada indicador, e $X_{\min}$ e $X_{\max}$ correspondem aos valores mínimo e máximo da escala (0 a 5). Após a relativização dos valores, o índice final foi classificado como alta ($IU > 0,6$), moderada ($0,6 > IU > 0,4$) ou baixa urbanização ($IU < 0,4$) (Checon et al., 2023).

2.2. Variáveis ambientais

Foram estudadas as variáveis ambientais: temperatura do ar, da água e da areia, salinidade da água, altura da maré, intensidade e direção do vento, além do teor de umidade da areia.

As temperaturas do ar, água e areia foram medidas com um termômetro de precisão de 0,1°C no início e final de cada coleta. A salinidade da água foi aferida com um refratômetro óptico. As variáveis meteoceanográficas, como altura da maré, intensidade e direção do vento foram obtidas no site Surf guru (www.surfguru.com.br). O teor da umidade da areia foi determinado pela diferença do peso inicial e peso final. Em cada coleta, uma amostra de 200g de areia era levada ao laboratório, pesada e, em

seguida colocada em estufa a 100°C por 24 horas. Após esse período, o peso final foi medido, permitindo a determinar o teor de umidade da areia.

2.3. Amostragem indireta e direta do caranguejo-fantasma

O método de amostragem do caranguejo – fantasma foi definido com base no horário de atividade de superfície (ver Apêndice B III – V), que inclui construção, manutenção das tocas e forrageamento (Fig. S5). Essa atividade foi observada durante o dia nos meses de março a agosto e à noite de setembro a fevereiro (Apêndice A III-VII), padrão documentado em praias subtropicais do hemisfério sul brasileiro (Alberto e Fontoura, 1999; do Vale et al., 2022).

A amostragem indireta foi realizada durante a baixa maré e o início da atividade de superfície, por meio de três transectos aleatórios de 2 x 2 m em cada praia, por um período de 12 meses, conforme a metodologia adaptada de Pombo e Turra (2013). A densidade de tocas do caranguejo-fantasma foi estimada pela média do número de tocas por metro quadrado, a partir da linha da maré até a última ocorrência de tocas nas dunas ou vegetação. Além disso, foi medido o diâmetro das tocas nos transectos (Apêndice B-VI), uma vez que essa medida se correlaciona com a largura da carapaça do caranguejo (de Oliveira et al., 2016). A amostragem direta envolveu a captura de caranguejos ativos e durou duas horas. Durante esse período, os caranguejos eram coletados manualmente ou pela escavação de tocas com sinais de atividade (Apêndice B-II a V). Os espécimes capturados foram colocados em sacos plásticos rotulados e armazenados em uma caixa térmica com gelo para eutanásia. Em laboratório, os caranguejos foram pesados e medidos a largura da carapaça (Apêndice A-I e II).

2.4. Análises de dados

Para detectar diferenças estatísticas entre os níveis de urbanização (baixo, médio e alto) das praias, a análise de variância (ANOVA) foi realizada, caso diferenças sejam detectadas, um teste post hoc de Tukey seria aplicado para identificar quais são as diferenças (Zar, 2010).

Para avaliar as semelhanças e diferenças entre os locais, foi utilizado variáveis ambientais, variáveis geomorfológicas das praias e o grau de urbanização dos locais por meio da análise de componentes principais (PCA) com variáveis padronizadas em escala unitária, usando o pacote ‘FactoMineR’ (Lê et al., 2008). Em seguida, aplicamos modelos aditivos generalizados (GAM) para identificar efeitos significativos das variáveis ambientais, geomorfológicas das praias e urbanização sobre a densidade de tocas, o

tamanho das tocas, a largura da carapaça e biomassa, utilizando a função “gam” do pacote “mgcv” (Wood et al., 2016). Por último, para verificar efeitos do índice de urbanização sobre os parâmetros de *O. quadrata*, foi utilizado modelos aditivos generalizados (GAM). Todas as análises estatísticas foram geradas no software R versão 4.4.1 (R Core Team, 2023).

3. Resultados

3.1. Caracterização ambiental, da geomorfologia e da urbanização nas praias

As amplitudes e médias das variáveis ambientais e morfológicas das praias estão disponíveis na tabela 1.

Tabela 1 – Amplitude, média e desvio das variáveis ambientais e morfológicas registradas entre março de 2017 e fevereiro de 2018 nas praias

Variável ambiental	Barra Velha		Navegantes		Itajaí	
	Amplitude	$\bar{x}$ e s	Amplitude	$\bar{x}$ e s	Amplitude	$\bar{x}$ e s
Ar (°C)	13.5 – 30	22.52±4.80	15 – 26	21.87±2.93	17.5 – 28	21.72±2.68
Areia (°C)	17 – 30	24.54±3.92	18 – 30	24.02±3.64	18 – 29	23.85±2.68
Água (°C)	19 – 27	22.45±2.67	19 – 26	22.65±2.38	19 – 25	22.29±2.00
Salinidade %	28 – 35	33±2.17	22 – 36	30.20±4.88	30 – 35	33.33±1.92
Umidade da Areia %	2.30 – 6.84	4.00±1.51	3.10 – 16.02	6.80±3.84	2.10 – 3.93	3.23± 0.59
Altura da máre (m)	0.2 – 0.9	0,55±0.18	0.2 – 0.9	0.60±0.19	0.3 – 1	0.66±0.22
Intensidade do vento (Km/h)	0 – 11	4.8±3.99	0 – 12	5.58±4.52	0 – 9	4.5±3.96

**Continuação
Tabela S2**

Direção do vento	Sudeste Maral (2)		Sudeste Maral (1)		Sudeste Maral (1)	
	Sul Sudeste Maral (1)		Leste Nordeste Maral (1)		Sul Sudeste Maral (1)	
	Leste Nordeste Maral (2)		Leste Maral (1)		Sul Sudeste Cruzado (1)	
	Leste Sudeste Maral (1)		Oeste Noroeste Terral (1)		Leste Nordeste Maral (1)	
	Norte Nordeste Maral (1)		Norte Cruzado (5)		Leste Maral (1)	
	Norte (4)		Nordeste Terral (1)		Norte Cruzado (4)	
	Nordeste Maral (1)		Nordeste Maral (2)		Norte Nordeste Maral (1)	
					Norte Nordeste Cruzado (1)	
				Nordeste Maral (1)		
Variável morfológica						
phi (φ)	0.16 – 1.04	0,71±0,33	0.16 – 1.04	2,64±0,24	0.16 – 1.04	1,87± 0,05
Tamanho do grão de areia	Média e Grossa		Fina		Fina e Média	
Largura da praia (m)	8 – 36	16.77±7.78	14 – 60	25.33±11.98	8 – 28	19.50±5.20
Inclinação (°)	1.59 – 7.12	5.35 ± 1.77	0 – 4.08	2.19 ± 1.91	0 – 8.50	4.50 ± 2.61

Os registros das maiores amplitudes de temperatura de ar, água e areia na praia de Barra Velha. A maior amplitude de altura de maré em Itajaí e a umidade da areia e intensidade de vento em Navegantes.

Os valores do índice de urbanização (Fig. 2, tabela S1) variaram de 0,13 a 0,72 (média $\pm$ desvio padrão: $0,42 \pm 0,25$) em Barra velha, de 0,36 a 0,93 ($0,61 \pm 0,24$) em Navegantes e 0,36 a 0,96 ($0,62 \pm 0,26$) em Itajaí. Apesar de Barra Velha apresentar um valor médio menor no índice de urbanização em comparação as outras praias, não foram observadas diferenças estatísticas quando submetido à ANOVA ($F_{2-33} = 2,629$; $p = 0,087$).

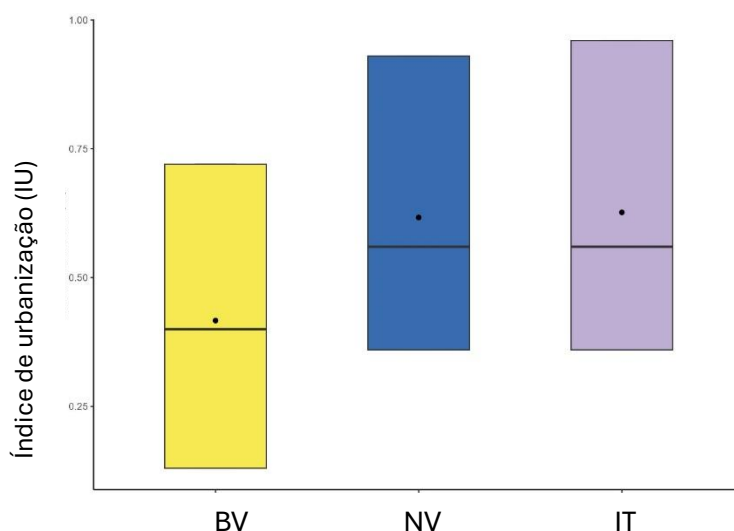


Fig. 2 – Índice de urbanização em praias do sul do Brasil: Barra Velha (BV), Navegantes (NV), e Itajaí (IT). Os boxplots mostram a variação dos dados, com linhas verticais que indicam o intervalo total, limites da caixa que representam o quartil superior e o quartil inferior, uma linha horizontal que indica o valor mediano e um ponto que indica a média.

A análise de componentes principais (PCA) explicou 51,6% da variação total dos dados ambientais. As variáveis que mais contribuíram para a separação dos locais foram a temperatura da areia (ST), do ar (AT) e da água (WT), seguidas pela inclinação (Slope) e salinidade (Salinity) (Fig. 3). De modo geral, observou-se uma discreta separação entre praias de Barra Velha (BV) e Navegantes (NV) com as maiores contribuições de ST, salinidade e inclinação para a praia BV, enquanto umidade da areia (Humidity), largura da praia (BW) e tamanho do grão de areia (phi) foram mais relevantes para NV.

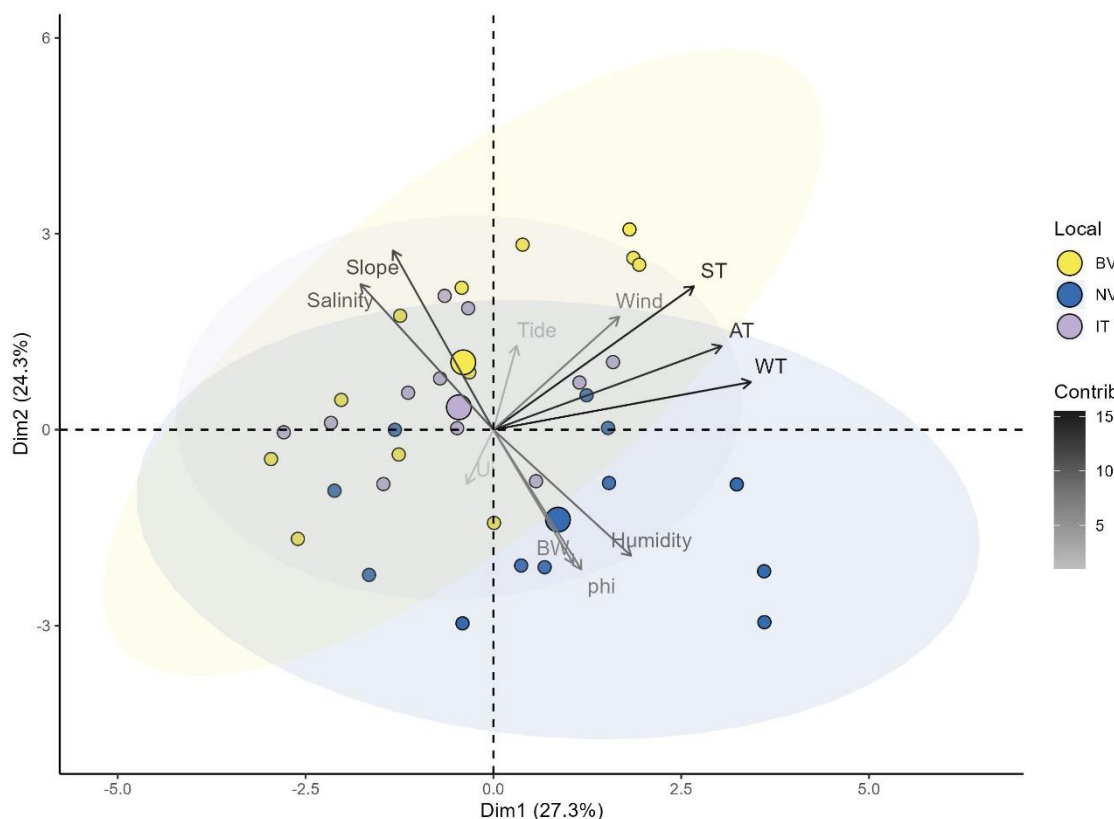


Fig. 3 – Análise de componentes principais (PCA) com as variáveis ambientais coletadas nas praias de Barra Velha (BV), Navegantes (NV) e Itajaí (IT). Siglas: ST – temperatura da areia; AT – temperatura do ar; WT – temperatura da água; BW – largura da areia; phi – tamanho do grão de areia; U – índice de urbanização.

3.2. Variáveis biológicas

O método indireto de análise de densidade populacional resultou em 1.012 tocas no total, sendo 400 em BV, 326 em NV e 286 em IT. Quanto ao método direto, indivíduos, foram capturados 660 caranguejos, dos quais 221 em BV, 186 em NV e 253 em IT. Os detalhes completos da amostragem indireta e direta na Tabela 2.

Tabela S2 – Amplitude, média e desvio dos parâmetros populacionais de *Ocypode quadrata* capturados entre março de 2017 e fevereiro de 2018 nas praias de Barra Velha, Navegantes e Itajaí. Dados descritos em amplitude, média e desvio

Praia	Densidade de tocas (m ²)	Diâmetro de tocas (mm)	Biomassa (g)	Largura da carapaça (mm)
Barra Velha (BV)	0,14 – 0,50 0,31 ± 0,12	8,42 – 82,54 30,72 ± 11,60	0,44 – 45,96 16,77 ± 10,88	9,43 – 42,80 28,97 ± 6,78
Navegantes (NV)	0,13 – 0,40 0,25 ± 0,06	8,60 – 63,33 30,45 ± 8,72	0,08 – 49,78 14,42 ± 12,13	5,61 – 45,01 26,60 ± 9,06
Itajaí (IT)	0,11 – 0,33 0,21 ± 0,08	5,46 – 54,48 28,60 ± 11,01	0,10 – 46,53 13,06 ± 9,38	5,90 – 43,22 26,19 ± 7,48

Ao avaliar as variáveis preditoras ambientais, geomorfológicas e antrópicas em relação as variáveis respostas do caranguejo *O. quadrata*, os modelos aditivos generalizados (GAM) apresentaram uma explicação que variou entre 28,30% a 52,90% (R – quadrado) (Tabela S2). As variáveis significativas foram as seguintes: o tamanho do grão de areia (Estimate = - 0,069; $t = -3,277$; $p = 0,003$) e a inclinação da praia (Estimate = -0,049; $t = -2,166$; $p = 0,040$) tiveram um efeito negativo no modelo de densidade de tocas. A temperatura do ar apresentou um efeito positivo (Estimate = 12,035; $t = 2,807$; $p = 0,010$) enquanto a inclinação da praia foi associada negativamente (Estimate = -6,813; $t = -2,511$; $p = 0,019$) no modelo de diâmetro das tocas. A variável intensidade do vento foi associada positivamente (Estimate = 1,670; $t = 2,118$; $p = 0,045$) e o índice de urbanização negativamente ao tamanho da largura da carapaça (Estimate = -1,413; $t = -2,305$; $p = 0,030$). A única variável associada de forma negativa com a biomassa foi a temperatura do ar (Estimate = -3,865; $t = -1,578$; $p = 0,036$).

Os modelos gerados, considerando apenas o índice de urbanização como preditor, são mostrados na Fig. 4. Observamos que o resultado foi significativo apenas para a largura da carapaça (Fig. 4c), enquanto que uma relação inversa foi observada para as variáveis resposta de *O. quadrata* (Fig. 4a,b,d). Assim, o grau de urbanização demonstra um efeito negativo sobre os parâmetros populacionais de *O. quadrata*.

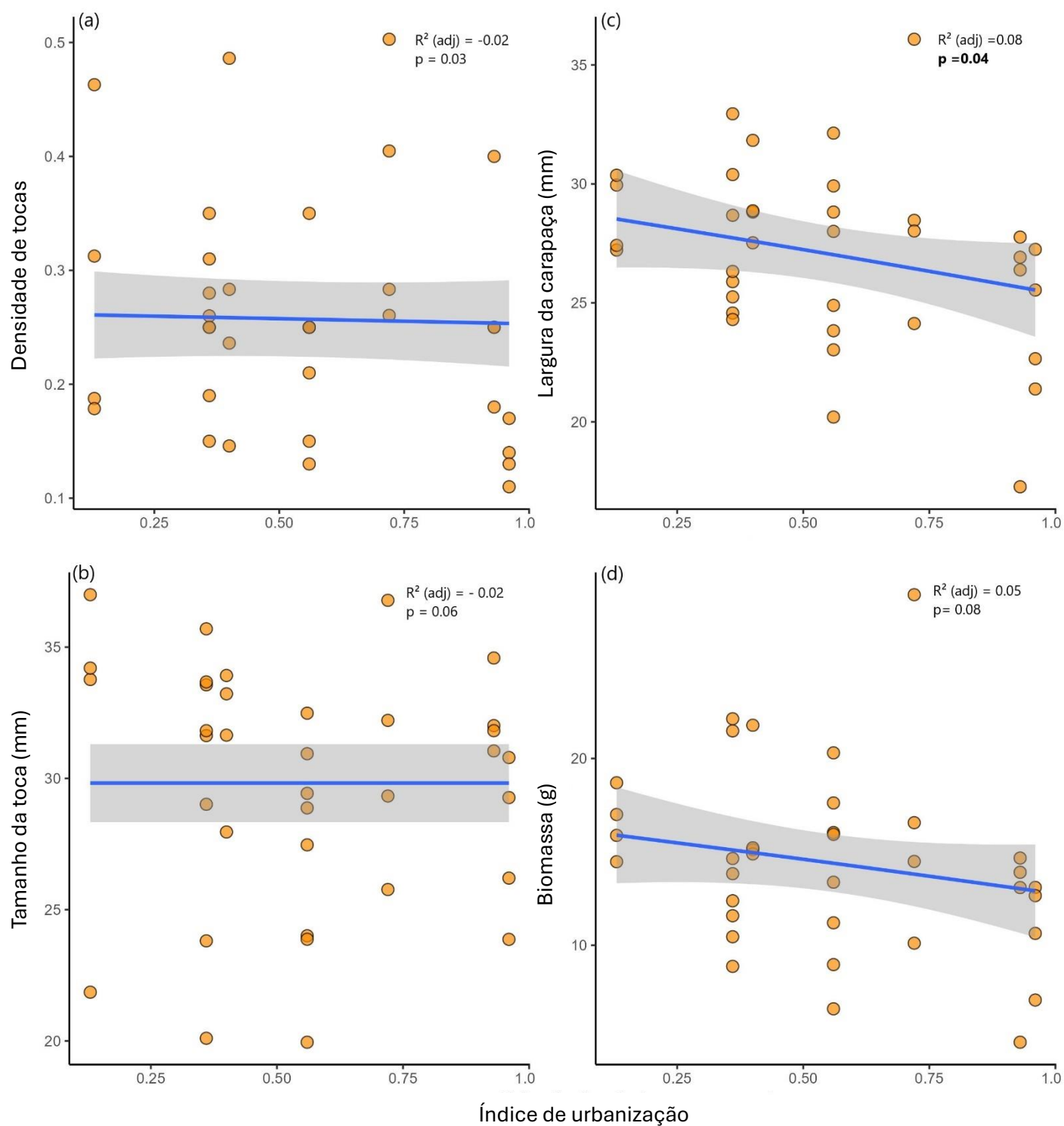


Fig. 4 – Gráficos dos modelos aditivos generalizados (GAM) demonstra o efeito da variável explicativa (índice de urbanização) para os parâmetros populacionais de *O. quadrata*. As áreas sombreadas indicam o intervalo de confiança de 95%.

4. Discussão

Os resultados demonstraram que o tamanho do grão de areia, a inclinação da praia, a temperatura do ar, a intensidade do vento e o índice de urbanização influenciaram significativamente parâmetros populacionais de *O. quadrata*. A análise integrada de múltiplos parâmetros do caranguejo-fantasma, aliada a métodos de censo indireto e direto, mostrou que cada variável biológica respondeu de maneira distinta aos preditores.

De modo geral, a densidade e diâmetro das tocas (dados indiretos) variaram em função da geomorfologia e das condições ambientais, enquanto a largura e a biomassa do caranguejo (dados diretos) foram mais sensíveis a fatores ambientais e antrópicos. Embora os aspectos da morfologia das praias e das condições ambientais atuem mais nas variações dos parâmetros populacionais do caranguejo, do que os impactos humanos, é essencial considerar os três tipos de preditores (geomorfológicos, ambientais e antrópicos) para uma interpretação precisa do caranguejo-fantasma como bioindicador, especialmente em cenários com diferentes condições geomorfológicas e ambientais (Checon et al., 2023).

Ao analisar os preditores sobre *O. quadrata* notamos que o aumento no tamanho dos grãos de areia (menores valores de ϕ) favoreceram o aumento de densidade de tocas. Por outro lado, a inclinação da praia apresentou um efeito negativo sobre a densidade e diâmetro das tocas. A durabilidade das tocas de *O. quadrata*, varia de 1 a 30 dias, e depende fortemente da estabilidade do local. Sabe-se que é influenciada por ações das ondas (e.g., inundações), pelo nível de compactação da areia, tamanho do grão, e pela inclinação da praia (Hughes, 1966; Campagnoli et al., 2018). O presente estudo, demonstrou que o aumento do tamanho do grão de areia (das praias intermediária-refletiva) teve associação com o aumento da densidade de tocas, um padrão que já foi reportado por estudos anteriores (Turra et al., 2005; Rosa e Borzone, 2008). De acordo com a hipótese de segurança de habitat (HSH), as características físicas da praia, como o tamanho do grão, modulam aspectos da história de vida e da sobrevivência dos organismos. Essa relação é evidente em *O. quadrata*, onde, mesmo em um ambiente com menor estabilidade do sedimento de areia e consequentemente com menor durabilidade das tocas, quando comparado as praias de grãos mais finos (maior estabilidade), a densidade de tocas ainda se mostra maior em praias de grãos mais grossos.

Além disso, a diminuição da inclinação da praia (intermediária – dissipativa) foi associada ao aumento tanto da densidade de tocas quanto do diâmetro das tocas. Esse padrão já foi documentado para a espécie *O. gaudichaudii* (Quijón et al. 2001) e o inverso

observado para *O. quadrata* em outro estudo (Pombo et al., 2017). A retenção de água em áreas menos inclinadas tende a ser maior, o que aumentaria durabilidade das tocas. Assim, destaca-se a importância de incluir o efeito do tamanho do grão de areia e da inclinação da praia ao aplicar o caranguejo-fantasma como bioindicador, pois as características físicas da praia têm sido apontadas como fontes significativas de confusão (Gül 2022; Checon et al., 2023).

Adicionalmente, a escolha metodológica é crítica para garantir a precisão dos dados. A contagem tradicional de tocas pode introduzir vieses (Silva e Calado, 2013), especialmente ao considerar tocas abandonadas. Para mitigar esse problema, foi considerado a contagem de tocas contendo sinal de atividade, escavação das tocas (Pombo e Turra, 2013) e complementado a metodologia observando as entradas das tocas para identificar a presença do caranguejo. Estudos recentes ressaltam a necessidade de novas abordagens para a avaliação indireta (Pombo et al., 2019; Gül 2022) e nesse contexto, também é apoiado a aplicação da metodologia de recontagem de tocas proposta por Pombo e Turra, 2019.

Estudos apontam que fatores ambientais, como condições da maré (Pombo et al., 2018), umidade da areia, temperatura do ar (Lucrezi et al., 2009) e intensidade do vento (Machado et al., 2019), exercem influência significativa sobre a atividade do caranguejo-fantasma. No presente estudo, os preditores ambientais mais relevantes foram a temperatura do ar e intensidade do vento. Foi observado que a temperatura foi positivamente associada ao diâmetro das tocas de forma negativa com a biomassa dos caranguejos. Como ectotérmicos, os caranguejos-fantasmas dependem do ambiente para regular a temperatura corporal, e as respostas comportamentais de *Ocypode* estão, na maioria, associadas à termorregulação (Vernberg e Vernberg, 1968; Hui e Willians, 2021).

Essas respostas, como a construção de tocas por indivíduos maiores em temperaturas mais elevadas, refletem adaptações fisiológicas e ecológicas que permitem ao caranguejo sobreviver em praias arenosas. O hábito fossorial, em particular, destaca-se por oferecer proteção contra a desidratação e auxiliar na termorregulação (Allen et al., 2012; Lucrezi e Schlacher, 2014). A umidade presente nas tocas, por exemplo, ajuda a manter as brânquias úmidas, enquanto os caranguejos acumulam energia térmica antes de emergirem à superfície (Watson et al., 2018).

A associação entre tocas maiores e o aumento da temperatura do ar em no presente estudo, pode ser explicada pelo papel das tocas no controle da temperatura corporal (superaquecimento em temperaturas mais elevadas), conforme descrito por

Watson et al. (2018). Caranguejos maiores, com maior inércia térmica, mantêm a temperatura por mais tempo, o que lhes permite permanecer ativos por períodos mais longos quando as temperaturas caem, explicando a associação entre temperaturas mais baixas e maiores valores de biomassa. Além disso, foi observado que caranguejos menores eram mais ativos na superfície em temperaturas mais altas, enquanto os maiores se mantinham próximos às tocas e à vegetação. Neste estudo, a amplitude térmica variou de 13,5 °C a 30 °C na praia refletiva (detalhes na tabela S2), coincidindo com o período de maior atividade dos caranguejos. Estudos anteriores registraram temperaturas mínimas de 12 °C para *O. quadrata* nos Estados Unidos (Lucrezi et al., 2014) e máximas de 34 °C nos Estados Unidos (Robertson e Pfeiffer 1982) e no México (Valero-Pacheco et al., 2007).

A intensidade do vento influenciou significativamente *O. quadrata*, com efeito positivo na largura da carapaça, i.e., indivíduos com carapaça maior são comumente encontrados em condições de vento mais forte. O caranguejo-fantasma é conhecido pela considerável tolerância a ventos fortes (Wolcott, 1978), e como a atividade locomotora desse animal também é afetada pela temperatura (Weinsten et al., 1994), é razoável inferir que com o aumento da intensidade do vento resulte em uma diminuição da temperatura. Portanto, essa maior tolerância a intensidade dos ventos também pode ser explicada pela maior inércia térmica em indivíduos maiores. Durante as observações, foi registrado a atividade do caranguejo em condições de vento de 12 km/h. Estudos relatam que os caranguejos se tornam inativos com ventos superiores a 15 km/h (Machado et al., 2019) e fecham a abertura da toca com ventos acima de 37 km/h (Lucrezi et al., 2009). Além disso, em ventos mais intensos, principalmente associado à direção Nordeste na região sul do Brasil, é comum que os animais fechem completamente as aberturas de toca, enquanto a areia carregada pelo vento acelera o processo (Alberto e Fontoura, 1999).

Nas coletas, foi notado que as rajadas de vento diminuía a atividade do animal, e o vento contribuía para o fechamento das tocas. As maiores intensidades de vento registradas com direção Sudeste maral (praia de Barra Velha), Leste-Nordeste (praia de Navegantes) e Nordeste (praia de Itajaí) (ver tabela S2). Essas condições ambientais adversas, como temperatura e velocidade do vento, afetam as avaliações indiretas e diretas, o que reforça a recomendação de limitar as saídas de campo em momentos que induzam à inatividade dos caranguejos (Lucrezi et al., 2009).

Entre os fatores analisados, a urbanização mostrou um efeito negativo significativo na largura da carapaça de *O. quadrata*, sendo que caranguejos de maior

largura são mais frequentemente encontrados em direção as áreas menos urbanizadas. Praias impactas por diversos estressores urbanos apresentam menor qualidade ambiental, o que pode resultar em efeitos subletais ou até letais nas populações (Augusto et al., 2023). A disponibilidade reduzida de presas nessas regiões afeta diretamente a dieta dos caranguejos (Cardoso et al., 2016; Gül e Griffen, 2020a), levando ao aumento do consumo de vegetais, e à consequente diminuição da energia disponível para atividades diárias (Gül e Griffen, 2019a). Essa limitação de recursos resulta em caranguejos com menor tamanho corporal, piora na condição reprodutiva e alteração no comportamento de escavação (Gül e Griffen, 2020; Gül e Griffen, 2019a). Além disso, a iluminação artificial nas praias urbanizadas intensifica a poluição luminosa, impactando o comportamento dos crustáceos, que apresentam redução no consumo de alimentos, desaceleração do crescimento e distúrbios no ritmo circadiano (Luarte et al., 2016; Duarte et al., 2019).

Os impactos antropogênicos e naturais já estão diminuindo a resiliência das populações de *O. quadrata* em áreas mais urbanizadas (Gül e Griffen, 2019b; Machado et al., 2019). Com a intensificação de condições climáticas extremas, como tempestades e ondas de calor nas áreas costeiras (Emanuel, 2005), esses estressores podem interagir de forma sinérgica, agravando os efeitos nos ecossistemas costeiros. A combinação de impactos locais e distúrbios naturais compromete não apenas a macrofauna, mas também o papel fundamental do caranguejo-fantasma nas teias tróficas, comprometendo o equilíbrio ecológico das praias arenosas.

5. Conclusão

Este estudo mostrou que parâmetros como a largura da carapaça, biomassa e diâmetro das tocas de *O. quadrata* variam em função da morfologia da praia, das condições ambientais (temperatura, vento) e dos impactos antrópicos. A largura da carapaça destacou-se como a métrica mais sensível ao índice de urbanização, com caranguejos maiores sendo encontrados em áreas menos urbanizadas, embora outros parâmetros também apresentassem associações negativas com a urbanização. Para evitar vieses na interpretação do caranguejo como bioindicador, é fundamental considerar variáveis como o tamanho do grão de areia, a inclinação da praia, a temperatura do ar e a intensidade do vento. A padronização metodológica em áreas geográficas próximas pode melhorar a precisão das métricas do caranguejo-fantasma. Compreender os impactos humanos e as interações com fatores ambiente é essencial para prever as respostas de *Ocypode* como bioindicador, permitindo uma aplicação mais eficaz no manejo costeiro.

Referências

- Alberto, R.M.F., Fontoura, N.F., 1999. Distribuição e estrutura etária de *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) (Crustacea, Decapoda, Ocypodidae) em praia arenosa do litoral sul do Brasil. *Rev. Bras. Biol.* 59, 95–108.
- Allen, B. J., Rodgers, B., Tuan, Y., Levinton, J. S. 2012. Size-dependent temperature and desiccation constraints on performance capacity: implications for sexual selection in a fiddler crab. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 438, 93-99.
- Araújo, S.A., Haymussi, H., Reis, F.H., Silva, F.E., 2006. Caracterização climatológica do município de Penha, S. C. p. 11-28. In: Branco, J. O- e Marenzi, (Org), A.W.C. (Eds.), Bases ecológicas para um desenvolvimento sustentável: estudo de caso em Penha, SC. Editora da UNIVALI, Itajaí, SC.
- Augusto, M., Abude, R. R., Cardoso, R. S., Cabrini, T. M., 2023. Local urbanization impacts sandy beach macrofauna communities over time. *Front. Mar. Sci.* 10, 1158413 DOI:10.3389/fmars.2023.1158413.
- Barboza, C.A.M., Mattos, G., Soares-Gomes, A., Zalmon, I.R., Costa, L.L., 2021. Low densities of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* related to large scale human modification of sandy shores. *Front. Mar. Sci.* 8, 103. doi: 10.3389/fmars.2021.589542.
- Barreto, A.S. *et al.* 2018. South America, Coastal Ecology. In: Finkl, C., Makowski, C. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science . Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4_295-2
- Barrilli, G. H. C., do Vale, J. G., Chahad-Ehlers, S., Verani, J. R., & Branco, J. O. (2024). Spatial patterns of beta diversity in marine benthic assemblages from coastal areas of southern Brazil and their implications for conservation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 297, 108603.
- Barros, F., 2001. Ghost crabs as a tool for rapid assessment of human impacts on exposed sandy beaches. *Biol. Conserv.* 97 (3), [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00116-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00116-6).
- Bessa, F., Cunha, D., Gonçalves, S. C., & Marques, J. C. 2013. Sandy beach macrofaunal assemblages as indicators of anthropogenic impacts on coastal dunes. *Ecological Indicators*, 30, 196-204.
- Branco, J. O., Hillesheim, J. C., Fracasso, H.A.A., Christoffersen, M. L., Evangelista C. L., 2010. Bioecology of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) (Crustacea: Brachyura) compared with other intertidal crabs in the southwestern Atlantic. *J. Shellfish Res.* 29 (2), 503–512. <https://doi.org/10.2983/035.029.0229>.
- Brown, A.C., McLachlan, A. 2002. Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation*, 29: 62–77.
- Camargo, M.G., 2005. SYSGRAN 3.0 – Análise e gráficos sedimentológicos. ' Open source under GNU License.
- Campagnoli, M. L., Pombo, M., & Turra, A. 2018. Ghost crab burrows simulation shows differential across-shore persistence. *Crustaceana*, 91(7), 821-830.

- Cardoso, R.S., Barboza, C.A.M., Skinner, V.B., Cabrini, T.M.B., 2016. Crustaceans as ecological indicators of metropolitan sandy beaches health. *Ecol. Ind.* 62, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.039>.
- Costa, L. L., da Costa, M. F., Zalmon, I. R. 2021. Macroinvertebrates as biomonitors of pollutants on natural sandy beaches: Overview and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 275, 116629.
- Costa, L. L., Zalmon, I. R., Fanini, L., Defeo, O., 2020a. Macroinvertebrates as indicators of human disturbances on sandy beaches: A global review. *Ecol. Indic.* 118, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106764>.
- Costa, L. L., Mothé, N. A., Zalmon, I. R. 2020c. Light pollution and ghost crab road-kill on coastal habitats. *Regional Studies in Marine Science*, 39, 101457.
- Costa, L. L., Secco, H., Arueira, V. F., Zalmon, I. R., 2020b. Mortality of the Atlantic ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) due to vehicle traffic on sandy beaches: A road ecology approach. *J. Environ. Manag.* 260, 110168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110168>
- Costa, L. L., Zalmon, I. R., Fanini, L., Defeo, O., 2020a. Macroinvertebrates as indicators of human disturbances on sandy beaches: A global review. *Ecol. Indic.* 118, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106764>.
- Costa, L. L., Fanini, L., Zalmon, I. R., Defeo, O., McLachlan, A. 2022. Cumulative stressors impact macrofauna differentially according to sandy beach type: a meta-analysis. *J. Environ. Manag.*, 307, 114594.
- Checon, H. H., Corte, G. N., Esmaeili, Y. S., Laurino, I. R. A., Turra, A. 2023. Sandy beach bioindicators: how each benthic taxon tells its own story. *Ocean Coast. Manag.* 240, 106645. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106645>
- Dale, V.H., Beyeler, S.C., 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecol. Indic.* 1 (1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(01\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(01)00003-6).
- de Souza, G.N., Oliveira, C.A.G., Tardem, A.S., Soares-Gomes, A., 2017. Counting and measuring ghost crab burrows as a way to assess the environmental quality of beaches. *Ocean Coast Manag.* 140, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.02.007>.
- Emanuel, K., 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*. 436, 686–688.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* 27 (1), 3–26.
- Defeo, O., Elliott, M., 2021. The ‘triple whammy’ of coasts under threat—Why we should be worried!. *Mar. Pollut. Bull.* 163(C), 111832. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111832>.
- de Oliveira, C.A.G., Souza, G.N., Soares-Gomes, A., 2016. Measuring burrows as a feasible non-destructive method for studying the population dynamics of ghost crabs. *Mar. Biodivers.* 46, 809–817. <https://doi.org/10.1007/s12526-015-0436-3>.
- do Vale, J.G., Barrilli, G.H. C., Chahad-Ehlers, S., Branco, J.O., 2022. Factors Influencing the Feeding Habits of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) on

- Subtropical Sandy Beaches. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 269, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107817>.
- Duarte, C., Quintanilla-Ahumada, D., Anguita, C., Manríquez, P.H., Widdicombe, S., Pulgar, J., Silva-Rodríguez, E.A., Miranda, C., Manríquez, K., Quijón, P.A., 2019. Artificial light pollution at night (ALAN) disrupts the distribution and circadian rhythm of a sandy beach isopod. *Environ. Pollut.* 248, 565–573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.037>.
- Emery, K. O. 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, 6, 90–93.
- González, S. A., Yáñez-Navea, K., & Muñoz, M. 2014. Effect of coastal urbanization on sandy beach coleoptera *Phaleria maculate* (Kulzer, 1959) in northern Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 83, 265–274
- Gül, M. R. 2022. Combined influence of human disturbance and beach geomorphology on Ghost Crab, *Ocypode cursor*, burrow density and size in the eastern Mediterranean. *Zoology in the Middle East*, 68(3), 225-236.
- Gül, M.R., Griffen, B.D., 2019a. Burrowing behavior and burrowing energetics of a bioindicator under human disturbance. *Ecol. Evol.* 00, 1–12. <https://doi.org/10.1002/ece3.5853>.
- Gül, M. R., Griffen, B. D. 2019b. Combined impacts of natural and anthropogenic disturbances on the bioindicator *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 519, 151185.
- Gül, M. R., Griffen, B. D. 2020. Diet, energy storage, and reproductive condition in a bioindicator species across beaches with different levels of human disturbance. *Ecological Indicators*, 117, 106636.
- Fanini, L., Defeo, O., Elliott, M., 2020. Advances in sandy beach research – local and global perspectives. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 234, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106646>.
- Folk, R.L., Ward, W.C., 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* 27 (1), 3–26.
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2019. Combined impacts of natural and anthropogenic disturbances on the bioindicator *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 519, 151185. doi: 10.1016/j.jembe.2019.151185
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2020. Diet, energy storage, and reproductive condition in a bioindicator species across beaches with different levels of human disturbance. *Ecol. Indic.* 117, 106636. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106636>.
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2020. Changes in claw morphology of a bioindicator species across habitats that differ in human disturbance. *Hydrobiologia* 847(14), 3025-3037. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04308-9>.
- Hughes, D.A. 1966. Behavioural and ecological investigations of the crab *Ocypode ceratophthalmus* (Crustacea: Ocypodidae). *Journal of Zoology* 150, 129–143.
- Hui, T. Y., Williams, G. A. 2021. Behavioural plasticity in the monsoonal tropics: implications for thermoregulatory traits in sandy shore crabs. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 75(5), 89.

- Jonah, F. E., Agbo, N. W., Agbeti, W., Adjei-Boateng, D., Shimba, M. J. 2015. The ecological effects of beach sand mining in Ghana using ghost crabs (*Ocypode species*) as biological indicators. *Ocean Coast, Manag.* 112, 18-24.
- Jones, A., Gladstone, W., Hacking, N. (2007). Australian sandy-beach ecosystems and climate change: ecology and management. *Australian Zoologist*, 34(2), 190-202.
- Krumbein, W.C., 1934. Size frequency distributions of sediments. *J. Sediment. Res.* 4, 65–77. <https://doi.org/10.1306/D4268EB9-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, 25, 1-18.
- Luarte, T., Bonta, C.C., Silva-Rodriguez, E.A.E., Quijón, P.A., Miranda, C., Farias, A.A.A., Duarte, C., 2016. Light pollution reduces activity, food consumption and growth rates in a sandy beach invertebrate. *Environ. Pollut.* 218, 1147–1153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.068>.
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., Robinson, W. 2009. Human disturbance as a cause of bias in ecological indicators for sandy beaches: experimental evidence for the effects of human trampling on Ghost Crabs (*Ocypode* spp.). *Ecological Indicators*, 9, 913
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., Robinson, W., 2010. Can storms and shore armouring exert additive effects on sandy-beach habitats and biota? *Mar. Freshw. Res.* 61 (9), 951-962. <https://doi.org/10.1071/MF09259>.
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., 2014. The ecology of ghost crabs- a review. *Oceanogr. Mar. Biol.* 52, 201–256.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. 2018. The state of the world's beaches. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.
- Machado, P.M., Costa, L.L., Suciu, M.C., Tavares, D.C., Zalmon, I.R., 2016. Extreme storm wave influence on sandy beach macrofauna with distinct human pressures. *Mar. Pollut. Bull.* 107, 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.009>.
- Machado, P. M., Tavares, D. C., Zalmon, I. R. 2019. Synergistic effect of extreme climatic events and urbanization on population density of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *Marine Ecology*, 40(2), e12525. <https://doi.org/10.1111/maec.12525>
- McLachlan, A., Brown, A. C., 2010. *The ecology of Sandy Shores*. Second ed. Elsevier Academic Press.
- McLachlan, A., Defeo, O., 2018. *The Ecology of Sandy Shores*, third ed. Elsevier Academic Press, London. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04773-6>.
- Nel, R., Campbell, E.E., Harris, L., Hauser, L., Schoeman, D.S., McLachlan, A., Derek, R., Bezuidenhout, K., Schlacher, T.A., 2014. The status of sandy beach science: past trends, progress, and possible futures. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 150, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.07.016>.
- Niemeijer, D., de Groot, R.S., 2008. A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecol. Ind.* 8, 14–25

- Noriega, R., Schlacher, T.A., Smeuninx, B., 2012. Reductions in ghost crab populations reflect urbanization of beaches and dunes. *J. Coast Res.* 279, 123–131. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00173.1>.
- Noy-Meir, I., 1979. Structure and function of desert ecosystems. *Isr. J. Bot.* 28, 1–19. <https://doi.org/10.1080/0021213X.1979.10676851>.
- Ocaña, F. A., A. de Jesús-Navarrete, H. A. Hernández-Arana, 2020. Co-occurring factors affecting ghost crab density at four sandy beaches in the Mexican Caribbean. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 36, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101310>.
- Ocaña, F.A., de Jesús-Navarrete, A., 2021. Using indirect methods to estimate population parameters of the Atlantic ghost crab from beaches in Northeastern Cuba. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 43, 101705 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101705>.
- Palmer, J.D. 1971. Comparative studies of circadian locomotory rhythms in four species of terrestrial crabs. *The American Midland Naturalist* 85, 97–107.
- Pombo, M., Turra, A. 2013. Issues to be considered in counting burrows as a measure of Atlantic ghost crab populations, an important bioindicator of sandy beaches. *PLoS One*, 8(12), e83792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083792>
- Pombo, M., De Oliveira, A.L., Xavier, L.Y., Siegle, E., Turra, A., 2017. Natural drivers of distribution of ghost crabs *Ocypode quadrata* and the implications of estimates from burrows. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 565, 131–147. <https://doi.org/10.3354/meps11991>.
- Pombo, M., Turra, A., 2019. The burrow resetting method, an easy and effective approach to improve indirect ghost-crab population assessments. *Ecol. Indicat.* 104, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.010>.
- Quijón, P., Jaramillo, E., Contreras, H., 2001. Distribution and Habitat Structure of *Ocypode gaudichaudii* H. Milne Edwards & Lucas, 1843, in Sandy Beaches of Northern Chile. *Crustaceana* 74, 91–103. <https://doi.org/10.1163/156854001505460>.
- Robertson, J.R., Pfeiffer, W.J. 1982. Deposit-feeding by the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 56, 165–177.
- Rosa, L. C. D., Borzone, C. A. 2008. Spatial distribution of the *Ocypode quadrata* (Crustacea: Ocypodidae) along estuarine environments in the Paranaguá Bay Complex, southern Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 25, 383–388.
- Sakai, K., Türkay, M., 2013. Revision of the genus *Ocypode* with the description of a new genus, *Hoplocypode* (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Mem. Queensl. Mus.* 56 (2), 665–793.
- Schlacher, T. A., Schoeman, D. S., Dugan, J., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F., & McLachlan, A. 2008. Sandy beach ecosystems: key features, sampling issues, management challenges and climate change impacts. *Marine ecology*, 29, 70–90.
- Schlacher, T.A., Schoeman, D.S., Dugan, J., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F., McLachlan, A., 2008. Sandy beach ecosystems: key features, sampling issues, management challenges and climate change impacts. *Mar. Ecol.* 29, 70–90. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2007.00204.x>

- Schlacher, T. A., Schoeman, D. S., Jones, A. R., Dugan, J. E., Hubbard, D. M., Defeo, O., et al., 2014. Metrics to assess ecological condition, change, and impacts in sandy beach ecosystems. *J. Environ. Manag.* 144, 322-335. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.036>.
- Schlacher, T.A., Lucrezi, S., Connolly, R.M., Peterson, C.H., Gilby, B.L., Maslo, B., Olds, A.D., Walker, S.J., Leon, J.X., Huijbers, C.M., Weston, M.A., Turra, A., Hyndes, G.A., Holt, R.A., Schoeman, D.S., 2016. Human threats to sandy beaches: a meta-analysis of ghost crabs illustrates global anthropogenic impacts. *Estuar. Coast. Shelf. S.* 169, 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.11.025>.
- Silva, W.T. , Calado, T.C. 2013. Number of ghost crab burrows does not correspond to population size. *Central European Journal of Biology*, 8: 843–847
- Suciu, M.C., Tavares, D.C., Zalmon, I.R., 2018. Comparative evaluation of crustaceans as bioindicators of human impact on Brazilian sandy beaches. *J. Crustac Biol.* 38, 420–428. <https://doi.org/10.1093/jcabiol/rux084>.
- Tiralongo, F., Messina, G., Marino, S., Bellomo, S., Vanadia, A., Borzì, L., ... & Lombardo, B. M. (2020). Abundance, distribution and ecology of the tufted ghost crab *Ocypode cursor* (Linnaeus, 1758)(Crustacea: Ocypodidae) from a recently colonized urban sandy beach, and new records from Sicily (central Mediterranean Sea). *Journal of Sea Research*, 156, 101832.
- Turra, A., Gonçalves, M., Denadai, M., 2005. Spatial distribution of the ghost crab *Ocypode quadrata* in low-energy tide-dominated sandy beaches. *J. Nat. Hist.* 39, 2163–2177. <https://doi.org/10.1080/00222930500060165>.
- Valero-Pacheco, E., Alvarez, F., Abarca-Arenas, L., Escobar, M., 2007. Population density and activity pattern of the ghost crab, *Ocypode quadrata*, in Veracruz, Mexico. *Crustaceana* 80, 313–325.
- Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., Plomaritis, T. A., Athanasiou, P., Luijendijk, A., & Feyen, L. 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature climate change*, 10(3), 260-263.
- Watson, G. S., Gregory, E. A., Johnstone, C., Berlino, M., Green, D. W., Peterson, N. R., ... & Watson, J. A. 2018. Like night and day: Reversals of thermal gradients across ghost crab burrows and their implications for thermal ecology. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 203, 127-136.
- Weinstein, R.B. 1995. Locomotor behaviour of nocturnal ghost crabs on the beach: focal animal sampling and instantaneous velocity from three-dimensional motion analysis. *Journal of Experimental Biology* 198, 989–999.
- Weinstein, R.B., Full, R.J. & Ahn, A.N. 1994. Moderate dehydration decreases locomotor performance of the ghost crab, *Ocypode quadrata*. *Physiological Zoology* 67, 873–891.
- Vernberg, W. B., & Vernberg, F. J. 1968. Physiological diversity in metabolism in marine and terrestrial Crustacea. *American Zoologist*, 8(3), 449-458.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *J. Geol.* 30, 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>.

- Wolcott, T. G., 1978. Ecological role of ghost crabs, *Ocypode quadrata* (Fabricius) on an ocean beach: scavengers or predators? J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 31 (1), 67-82. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(78\)90137-5](https://doi.org/10.1016/0022-0981(78)90137-5).
- Wood, S. 2016. mgcv: Mixed GAM Computation Vehicle with GCV/AIC/REML Smoothness Estimation. *R package version, 1(6)*.
- Zar, J. H., 2010. Biostatistical Analysis. 5th Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Material Suplementar

Tabela S1 – Índice de urbanização para as áreas de BV, NV e IT. Critérios de González et al. (2014), com pontuações de 0 a 5. O cálculo seguiu o método de Gover, utilizando a fórmula: $X = \sum ((X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}))$, onde X é a pontuação da categoria e Xmin e Xmax os valores mínimo e máximo da escala (0 a 5). Legenda: LI – baixo impacto; MI – moderado impacto; HI – alto impacto

Praia	Barra Velha BV			Navegantes NV			Itajaí IT		
Tipo de praia	Refletiva			Dissipativa			Intermediária		
Nível	LI	MI	HI	MI	LI	HI	LI	MI	HI
Categoria									
Proximidade do centro urbano	1	3	5	3	2	5	1	3	5
Construções na areia	0	2	5	0	0	4	1	2	5
Limpeza da praia	0	0	1	3	2	5	0	1	5
Resíduos sólidos na areia	1	3	4	4	2	5	3	4	5
Tráfego de veículos na areia	1	2	3	3	2	4	2	3	4
Frequência de visitantes	1	2	4	4	3	5	4	4	5
Índice de urbanização (UI)	0.13	0.40	0.72	0.56	0.36	0.93	0.36	0.56	0.96

Tabela S2 – Modelos de Adição Generalizados (GAM) dos parâmetros populacionais de *O. quadrata* e as variáveis explicativas. Os efeitos das variáveis significativas estão em negrito

Densidade	Estimate	SE	t	Pr(> t)	R-sqr	Deviance
(Intercept)	0.257	0.015	17.211	5.25E-15	0.214	46.10%
Areia %	0.009	0.018	0.542	0.600		
Salinidade	-0.013	0.022	-0.600	0.560		
Ar °C	0.072	0.036	2.016	0.055		
Areia °C	-0.051	0.033	-1.532	0.139		
Água °C	-0.016	0.038	-1.256	0.221		
Altura maré	0.020	0.022	0.907	0.373		
Vento (km/h)	0.014	0.023	0.629	0.535		
Phi (φ)	-0.069	0.021	-3.277	0.003		
Largura praia	-0.009	0.018	0.497	0.623		
Inclinação °	-0.049	0.022	-2.166	0.040		
Ui	-0.013	0.018	-0.712	0.483		

Diâmetro da toca	Estimate	SE	t	Pr(> t)	R-sqr	Deviance
(Intercept)	31.850	1.784	17.851	2.32E-15	-0.462	28.3%
Areia %	-1.157	2.123	-0.545	0.591		
Salinidade	4.153	2.615	1.588	0.125		
Ar °C	12.035	4.288	2.807	0.010		
Areia °C	-5.221	4.008	-1.302	0.205		
Água °C	-8.041	4.550	-1.767	0.090		
Altura maré	4.049	2.582	1.568	0.130		
Vento (km/h)	0.510	2.761	0.185	0.855		
Phi (φ)	-1.897	2.519	-0.753	0.459		
Largura praia	0.715	2.145	0.333	0.742		
Inclinação °	-6.813	2.713	-2.511	0.019		
Ui	-1.867	2.146	-0.870	0.393		
Largura	Estimate	SE	t	Pr(> t)	R-sqr	Deviance
(Intercept)	27.030	0.510	53.050	<2e-16	0.313	52.90%
Areia %	0.129	0.606	0.213	0.833		
Continuação Tabela S4						
Salinidade	-1.113	0.747	-1.490	0.149		
Ar °C	-2.165	1.225	-1.768	0.090		
Areia °C	0.562	1.145	0.491	0.628		
Água °C	1.257	1.299	0.968	0.343		
Altura maré	-0.452	0.737	-0.613	0.546		
Vento (km/h)	1.670	0.788	2.118	0.045		
Phi (φ)	-1.289	0.719	-1.792	0.086		
Largura praia	-0.042	0.613	-0.068	0.946		
Inclinação °	0.685	0.775	0.885	0.385		
Ui	-1.413	0.613	-2.305	0.030		
Biomassa	Estimate	SE	t	Pr(> t)	R-sqr	Deviance
(Intercept)	14.401	0.726	19.849	<2e-16	0.171	43.10%
Areia %	0.457	0.863	0.529	0.602		
Salinidade	-1.271	1.063	-1.195	0.244		

Ar °C	-3.865	1.744	-2.216	0.036
Areia °C	2.110	1.630	1.294	0.208
Água °C	1.749	1.850	0.945	0.354
Altura maré	-1.247	1.050	-1.188	0.247
Vento (km/h)	1.006	1.123	0.896	0.379
Phi (φ)	-1.673	1.024	-1.633	0.115
Largura praia	0.076	0.872	0.087	0.932
Inclinação °	0.727	1.103	0.659	0.516
Ui	-1.377	0.873	-1.578	0.128

Capítulo II. Características biológicas do caranguejo-fantasma
***Ocypode quadrata*: implicações como bioindicadores em praias**
arenosas



Características biológicas do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata*: implicações
como bioindicadores em praias arenosas

Resumo

A paisagem de praias arenosas tem sido sujeita a transformações atribuídas a fenômenos climáticos e atividades humanas. Para avaliar a condição ambiental dessas praias, métricas são empregadas na gestão costeira. Entre essas métricas, bioindicadores, especialmente crustáceos, são amplamente utilizados em praias arenosas em todo o mundo. O caranguejo fantasma (*Ocypode*) se destaca por sua capacidade de responder aos impactos das mudanças climáticas e atividades humanas. Apesar de sua ampla adoção em avaliações ecológicas, há lacunas na compreensão de como as características biológicas desse caranguejo variam ao longo do ano e em praias morfodinâmicas. Portanto, conduzimos uma avaliação das características biológicas (densidade de tocas, biomassa, comprimento, largura da carapaça e fator de condição relativa) de *Ocypode quadrata* em relação aos fatores estação e praia, que têm sido pouco explorados. Observamos que, no geral, essas características biológicas variaram significativamente ao longo do ano e entre diferentes praias morfodinâmicas. Notavelmente, biomassa, comprimento e largura da carapaça exibiram flutuações sazonais semelhantes, com valores mais altos durante o verão e o inverno. Por outro lado, o fator de condição relativa (condição corporal) atingiu o pico no outono. Identificamos que a biomassa, o comprimento e a largura da carapaça foram maiores em praias reflexivas em comparação com praias intermediárias e dissipativas. Isso revela a necessidade de entender as flutuações nas características do caranguejo fantasma ao longo do ano e/ou em diferentes praias morfodinâmicas para minimizar vieses ao aplicar esse caranguejo como um bioindicador. Posteriormente, testamos o caranguejo fantasma como um bioindicador e descobrimos que suas características biológicas variaram positivamente com o aumento da área de vegetação em praias arenosas. Nossos resultados confirmam o caranguejo como um bom indicador ecológico, contribuindo como uma métrica aplicável e eficiente para o gerenciamento de praias arenosas. A abordagem integrada, considerando múltiplas características biológicas como bioindicadores, mostra-se essencial para avaliar a condição ambiental nesses ecossistemas ameaçados, enfatizando a importância de práticas sustentáveis de gerenciamento ambiental.

Palavras-chave: Ocypodidae, Indicadores ecológicos, Dunas costeiras, Supressão de vegetação

1. Introdução

As zonas costeiras e estuarinas estão consideradas entre os ambientes mais ameaçados do mundo (Worm et al., 2006), enfrentam impactos significativos devido à ocupação antrópica, com praias arenosas e dunas sendo particularmente afetadas (McLachlan e Defeo, 2018; Defeo e Elliott, 2021). A perda de habitat ocasionada pela compactação da areia, uso de veículos, atividades de lazer e supressão da vegetação nativa, tem afetado a qualidade do ambiente e diversidade das espécies que habitam esses ecossistemas (Defeo et al., 2009; Orlando et al., 2020). Mudanças de temperatura e alterações nos regimes de chuvas têm provocado impactos adicionais, como erosões e recuo da praia (Fanini et al., 2020). Adicionalmente, a paisagem das praias arenosas vem passando por uma transformação contínua, submetida ao chamado "golpe triplo" que compreende: I) crescimento da urbanização e industrialização, II) uso excessivo dos recursos naturais e III) diminuição da resiliência e resistência aos efeitos das mudanças climáticas (McLachlan e Brown, 2010; Defeo e Elliott, 2021).

Além disso, a gestão das praias arenosas tem sido negligenciada devido à falta de clareza em torno do termo 'praia', levando à sua inclusão na gestão dos ecossistemas costeiros sem delinear os requisitos específicos que as praias arenosas exigem (Elliott et al., 2019; Fanini et al., 2020). Portanto, é crucial reconhecer as características únicas das praias arenosas para o desenvolvimento e implementação de estratégias de gestão eficazes. Entre as lacunas na compreensão das praias arenosas, as métricas ecológicas, particularmente os indicadores biológicos, são essenciais para avaliação da condição deste ambiente (Schlacher et al., 2014).

As respostas da fauna e flora nesses ecossistemas têm sido utilizadas como ferramentas na avaliação dos impactos antrópicos e climáticos (Dale e Beyeler, 2001; Niemi e McDonald, 2004). Esses bioindicadores geralmente refletem a intensidade do estresse e revelam o grau de resposta ecológica dos organismos diante da exposição (Lindenmayer, 1999; Siddig et al., 2016). Dentro desse contexto, os crustáceos emergem como elementos-chave no monitoramento e manejo de praias arenosas e dunas, devido à abundância e sensibilidade às diferentes atividades humanas (Suciu et al., 2018; Costa et al., 2020a; Ocaña et al., 2020). Destacando-se nesse grupo, o caranguejo-fantasma (*Ocypode quadrata*), tem sido utilizado como um indicador ecológico em praias arenosas tropicais e temperadas (Lucrezi e Schlacher, 2014; Schlacher et al., 2016). A presença abundante e sensibilidade a alterações ambientais, aliadas ao tamanho corpóreo e à

abertura de tocas ao longo da praia até as dunas (Sakai e Türkay, 2013; Lucrezi e Schlacher, 2014), viabilizam a aplicação como um bioindicador.

Reconhecido como um organismo guarda-chuva, a conservação desse caranguejo não apenas assegura a sua própria proteção, mas também contribui para a preservação de outras espécies nas praias arenosas (Fleishman et al., 2001; Simberloff, 1998; Costa e Zalmon, 2021). O caranguejo-fantasma responde negativamente aos diferentes estressores de origem antrópica, como pisoteio em praia, tráfego de veículos e supressão da vegetação costeira (Schlacher et al., 2011; Costa et al., 2020b; Barboza et al., 2021). Essas perturbações não apenas afetam diretamente a população do caranguejo, mas também têm repercussões significativas na dinâmica geral nas praias arenosas (Defeo e Elliot, 2021). A cobertura vegetal, por exemplo, desempenha um papel essencial para dinâmica praias (McLachlan e Brown, 2010; Orlando et al., 2020). Além de contribuir para a diversidade e estrutura da macrofauna e aves, a vegetação atua como abrigo, estabiliza tocas, proporciona área de forrageio e nidificação para aves e tartarugas, além de oferecer proteção contra fenômenos climáticos adversos (Lucrezi et al., 2010; Schlacher et al., 2011; Gül e Griffen, 2019).

Estudos do caranguejo-fantasma como um bioindicador de perturbação humana têm ganhado notoriedade (Gül e Griffen, 2018; Barboza et al., 2021), pois o tamanho individual e populacional pode ser estimado a partir do número e tamanho da abertura das tocas. O censo indireto é uma abordagem não invasiva e considerada uma técnica de baixo custo (Lucrezi et al., 2009; Schlacher et al., 2016), destacando-se como uma ferramenta significativa para o monitoramento ambiental. Em contrapartida, a captura de indivíduos (censo direto), fornece dados biológicos, permitindo avaliar o "bem-estar do animal" por meio da biomassa (peso corporal), comprimento, largura e condição corporal do caranguejo (Gül e Griffen, 2020a; Augusto et al., 2023). A condição corporal é medida pelo fator de condição relativo (Kn), o qual pode ser influenciado por variações fisiológicas, mudanças ambientais ou antropogênicas (Froese 2006; Costa et al., 2022a).

Apesar do uso do caranguejo fantasma como bioindicador em praias arenosas, ainda há uma compreensão limitada de como a sazonalidade e o tipo de praia afetam as características e a história de vida do caranguejo (de Oliveira et al., 2016; Checon et al., 2023). Essa falta de conhecimento é preocupante, pois pode levar a vieses, resultando em superestimações ou subestimações. Desta forma, este estudo tem como objetivo explorar como as características biológicas de *O. quadrata* são influenciadas pela sazonalidade e pela morfodinâmicas das praias no sul do Brasil. Além disso, avaliamos essas

características biológicas como potenciais bioindicadores em função da cobertura vegetal das praias. Ao empregar métodos de censo indireto e direto, foi hipotetizado que o aumento da cobertura vegetal das praias arenosas exerce influência positiva nas características biológicas do *O. quadrata*. Uma vez que o caranguejo-fantasma é considerado um indicador de perturbação humana em praias arenosas ao redor do mundo, esta abordagem aumentará significativamente a aplicação como bioindicador e melhorará a compreensão das características biológicas desta espécie, que ainda apresentam lacunas no conhecimento, auxiliando os profissionais de conservação na utilização eficaz de bioindicadores em ecossistemas de praia.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

As coletas foram mensais no período de março de 2017 a fevereiro de 2018, em três praias no litoral centro-norte de Santa Catarina, Brasil (Fig. 1A) sob a licença do número 57786 do Sistema de Autorização e Informação sobre Biodiversidade (SISBIO). A classificação da morfodinâmica das praias foram as seguintes: refletiva (Barra Velha), dissipativa (Navegantes) e intermediária (Itajaí) descrita por do Vale et al. (2022).

A praia da Lagoa de Barra Velha, localizada no município de Barra Velha (26°34'56.64" - 26°37'37.70" S; 48°39'55.38" - 48°40'49.12" W) com 6.0 km de extensão, apresenta declive acentuado, grãos de areia grossa e zona de surfe estreita, dunas recobertas por arbustos e árvores de médio porte (Fig. 1B-C), frequentada principalmente por pescadores e moradores locais.

A Praia de Navegantes (26°49'36,5" - 26°54'35.46" S; 48°37'17.36" - 48°38'34.61" W) com 10.0 km de extensão, apresenta grãos de areia finos, declive suave, longa extensão de dunas com vegetação rasteira, arbustos e árvores de médio porte (Fig. 1D-E). Essa praia é utilizada por banhistas como local de lazer, recreação e turismo.

A Praia Brava localizada no município de Itajaí (26°55'57.30" - 26°57'36.02" S; 48°37'35.08" - 48°37'41.35" W) com 3.0 km de extensão, apresenta declividade moderada, grãos de areia médios e zona de surf média, dunas recobertas por vegetação rasteira e presença de arbustos. Essa praia recebe maior quantidade de banhistas e turistas do que as anteriores devido à sua infraestrutura (Fig. 1F-G).

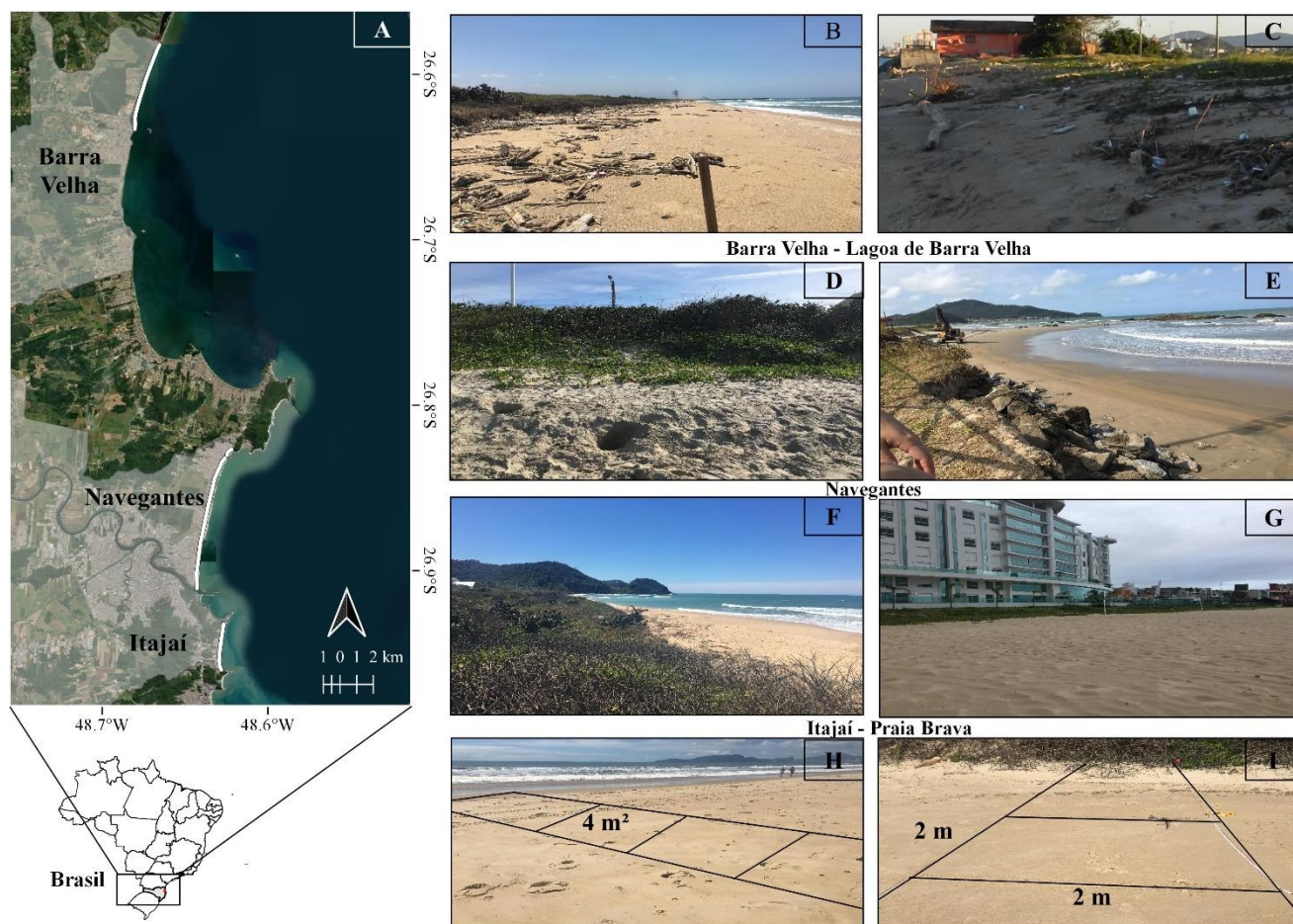


Fig. 1 – Localização das áreas de amostragem na costa sul do Brasil (A) compreendendo Barra Velha (B-C), Navegantes (D-E) e Itajaí (F-G). A densidade de tocas ocorreu por meio da contagem de toca de *O. quadrata* em três transectos aleatórios, com parcelas de 4m². Iniciado na linha da maré e até a última toca observada perto das dunas/vegetação (H-I). Créditos das fotos: Bing Maps Aerial (A); J.G. do Vale (B-I).

2.2. Procedimentos de amostragem

2.2.1. Variáveis ambientais

No estudo anterior (do Vale et al, 2022), as variáveis ambientais foram registradas mensalmente no início e no final de cada coleta, como temperatura da água, temperatura do ar, temperatura da areia, umidade da areia e salinidade e assim foram quantificadas e analisadas. As praias não apresentaram diferenças significativas nessas variáveis, exceto para umidade da areia, que foi maior na praia de Navegantes. Cada praia foi dividida em três seções proporcionais: Praia da Lagoa em Barra Velha, Navegantes e Itajaí, permitindo a coleta de amostras replicáveis ao longo do ano. A área de vegetação foi determinada em transectos, iniciando-se a medição a partir do ponto inicial de uma vegetação rasteira, arbusto ou árvore de porte médio. A medição da área de vegetação (m²) foi realizada em cada coleta com o auxílio de uma fita métrica, totalizando 12 amostras em cada praia.

2.2.2. *Variáveis biológicas*

Para realizar os censos indiretos (contagem de tocas) e os diretos (amostragens de espécimes) ao longo do ano e evitar possíveis vieses na contagem de tocas e na captura de espécimes, foi realizado o rastreamento da atividade de superfície do caranguejo fantasma (Apêndice B-II) (ou seja, atividades de superfície como construção de tocas, manutenção e forrageamento) (Apêndice B III – V) (Jones, 1972; Evans et al., 1976; Lucrezi e Schlacher, 2014). A atividade de superfície do caranguejo nessa região geográfica ocorre durante o dia no outono-inverno, enquanto na primavera-verão, ocorre à noite (Apêndice A III-VII) (do Vale et al., 2022).

A contagem de tocas foi realizada nas marés baixas, por meio de três transectos aleatórios (2x2 m) em cada praia durante 12 meses (ver Fig. 1H-I), conforme a metodologia de Pombo e Turra (2013). Assim, a densidade de tocas foi estimada pela média do número de tocas por metro quadrado, começando pela linha da maré e até a última ocorrência de toca nas dunas. Após a conclusão dos transectos, a coleta ativa de caranguejos foi iniciada. Isso ocorria em um período de duas horas de busca manual e captura de caranguejos, conforme eles se moviam espontaneamente pela superfície da praia, bem como a escavação de tocas identificadas por sinais de atividade (Pombo e Turra, 2013). Os caranguejos capturados foram colocados individualmente em sacos plásticos, devidamente etiquetados, e mantidos em uma caixa térmica com gelo para eutanásia.

2.2.3. *Biomassa, largura, comprimento e fator de condição relativo*

Em laboratório, os dados biológicos foram medidos com um paquímetro digital de precisão 0,01 mm: largura (Lc) e o comprimento da carapaça (Cc) (Apêndice A-I e II). Enquanto a biomassa (peso corporal fresco), foi aferido em uma balança analítica de alta precisão. Para avaliar as condições fisiológicas do *O. quadrata* foi empregado o fator de condição relativo (Kn). A relação peso/largura foi estabelecida pela equação $P = a.Lc^b$ (Le Cren, 1951) utilizando os coeficientes “a” e “b” para calcular os pesos esperados (Pe) correspondentes à largura da carapaça (Lc). Em seguida, o Fator de Condição Relativo (Kn) (Le Cren, 1951) foi calculado como a razão entre Po e Pe para cada exemplar amostrado em cada praia.

2.3. *Análise de dados*

A análise de variação por permutação – PERMANOVA (Anderson, 2001) foi conduzida usando a função *adonis* pelo pacote *vegan* (Oksanen et al., 2020; R Core Team,

2020) para avaliar diferenças na área da vegetação e no número de tocas por metro quadrado entre as praias e estações do ano. Os dados biológicos: biomassa (Po), comprimento (Cc) e largura (Lc) da carapaça, e fator de condição corporal (Kn) do caranguejo-fantasma, foram analisados por meio da PERMANOVA com base na matriz de similaridade de Bray-Curtis, considerando como fatores as praias, as estações do ano e suas interações.

Considerando a importância da área de vegetação na existência da macrofauna em praias arenosas (Cardoso et al., 2016; Orlando et al., 2020; Barboza et al. 2021), esse parâmetro foi utilizado para avaliar seu impacto nas características biológicas (tocas/m², Po, Cc, Lc, Kn) de *O. quadrata* nas praias. A análise dessas interações foi realizada com os valores médios mensais usando o modelo linear generalizado (GLM) com distribuição quasipoisson, implementado no pacote *vegan* (Oksanen et al., 2020; R Core Team, 2020). As análises estatísticas e os gráficos foram executados no software R versão 4.3.1.

3. Resultados

3.1. Variáveis ambientais

Em Barra Velha (B) os valores da área de vegetação variaram de 35,13 a 591,33 m² (média e desvio padrão: 182,40±164,84), com as maiores e menores médias registradas no inverno (326,60±270,87) e na primavera (112,10±72,94), respectivamente. Para Navegantes, a vegetação variou de 32,22 a 539,74 m² (296,87±161,18), com a maior média no verão (466,82±16,54) e a menor média no inverno (198,11±77,99). Em Itajaí, a média da vegetação variou de 37,64 a 245,59 (128,15±65,10), com os maiores e menores valores médios no verão (167,74±32,72) e inverno (108,94±107,59), respectivamente.

Os resultados da PERMANOVA demonstraram que a área da vegetação foi significativa, apenas para o fator praia (Tabela 1), registrada em Navegantes quando comparada com Barra Velha ($F = 3,266; p < 0,01$) e Itajaí ($F = 7,211; p < 0,01$). Desta forma, Navegantes apresenta a maior área de vegetação por m², seguido de Barra Velha e Itajaí.

Tabela 1 – Resultado da análise de variância de permutação entre as praias (Barra Velha, Navegantes e Itajaí) e estações (Primavera, Verão, Outono e Inverno), com base na matriz de similaridade de Bray-Curtis para área de vegetação e tocas por metro quadrado. Legenda: df = graus de liberdade; SS = soma dos quadrados. Valores de *p* significativos em **negrito**

	df	Área de vegetação			Tocas/m ²		
		SS	F	P	SS	F	p
Estação (E)	3	0.221	0.759	0.575	0.038	0.308	0.868
Praia (P)	2	0.664	3.415	0.028	0.163	2.002	0.141
Interação (ExP)	6	0.586	1.006	0.451	0.097	0.398	0.908
Resíduo	24	2.332			0.976		
Total	35	3.803			1.274		

3.2. Características biológicas do caranguejo-fantasma

Durante o período de março de 2017 a fevereiro de 2018, dados de *O. quadrata* foram amostrados nas praias por meio de censo direto e indireto. Usando o método de censo indireto, a densidade de tocas variou ligeiramente entre as diferentes estações e praias (Fig.2). A praia de Barra Velha, teve a maior média durante o verão ($0,35 \pm 0,11$) e a menor no outono ($0,27 \pm 0,12$).

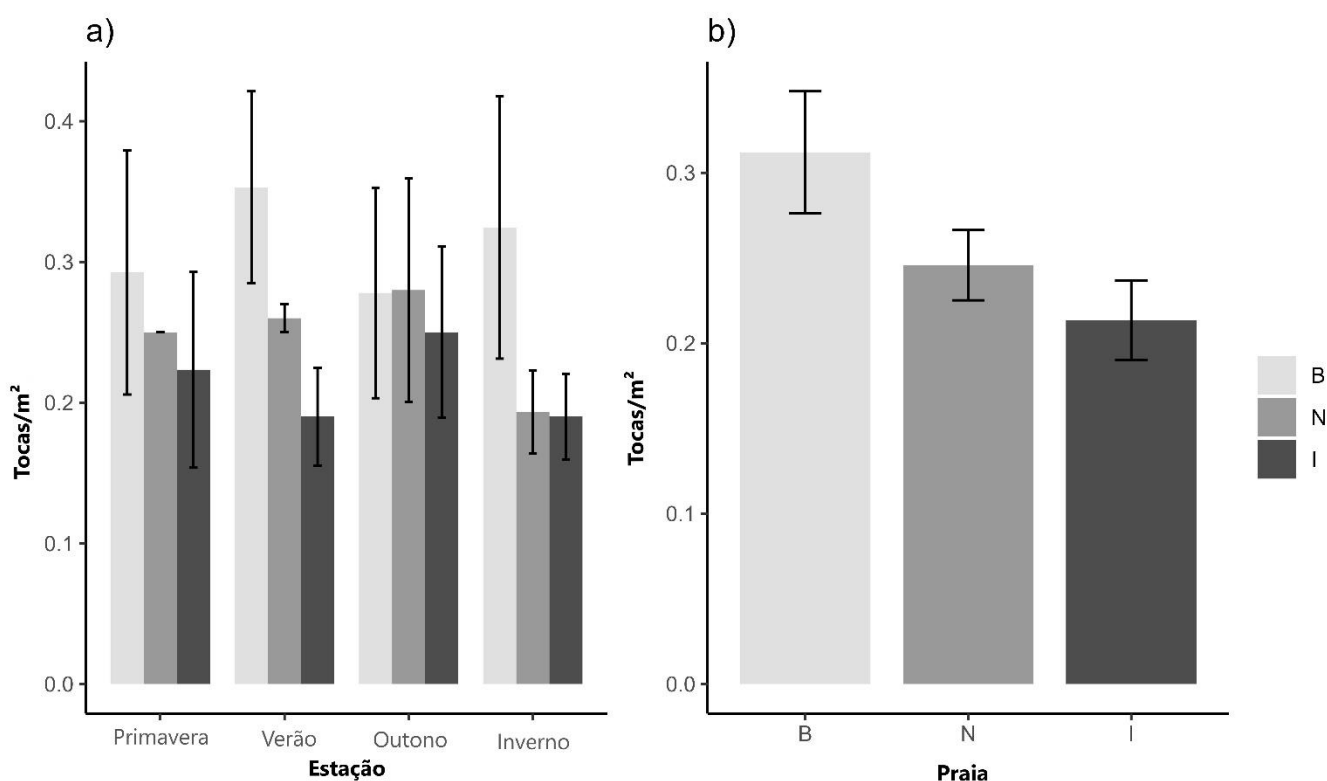


Fig. 2 – Valores médios e desvio padrão da densidade de tocas por metro quadrado em relação a estação do ano (a) e as praias (b). Legenda: Barra Velha – B, Navegantes – N, Itajaí – I.

A praia de Navegantes, teve a maior média no outono ($0,28 \pm 0,07$) e a menor média no inverno ($0,19 \pm 0,02$). Em Itajaí, a maior média ocorreu no outono ($0,25 \pm 0,06$) e as menores médias na primavera-verão ($0,19 \pm 0,03$). Apesar dessas variações, a PERMANOVA não detectou diferenças significativas em relação as estações, praias e as interações (estações vs praias) (Tabela 1).

Ao longo do estudo, 660 indivíduos de *O. quadrata* foram capturados e os dados biológicos (Po, Cc, Lc, Kn) foram avaliados por estação e por praia (ver Tabela S1). Ao submeter os dados de biomassa (Po) à análise PERMANOVA detectou diferenças significativas para o fator estação do ano ($F=5,0934$; $p=0,002$) e para o fator praia ($F=10,827$; $p=0,004$) (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultado da análise de variância de permutação entre as praias (Barra Velha, Navegantes e Itajaí) e as estações (Primavera, Verão, Outono e Inverno), com base na matriz de similaridade de Bray-Curtis para biomassa, comprimento de carapaça, largura de carapaça, largura de carapaça, fator de condição considerando a largura (Kn) dos indivíduos de *Ocypode quadrata*. Legenda: df = graus de liberdade; SS = soma dos quadrados. Valores de p significativos em negrito

Source	df	Biomassa			Comprimento			Largura			Kn		
		SS	Pseudo-F	p	SS	Pseudo-F	p	SS	Pseudo-F	P(perm)	SS	Pseudo-F	p
Estação (E)	3	2997.3	5.0934	0.002	3709.6	4.8049	0.001	5111.9	6.7625	0.001	4514.9	33.411	0.001
Praia (P)	2	4813.9	10.827	0.004	6631.4	10.169	0.002	6164.4	8.8706	0.006	88.293	0.53433	0.66
(E) x (P)	6	1343	1.1411	0.319	1980.2	1.2824	0.226	2118	1.4009	0.177	508.79	1.8826	0.073
Residual	648	127110			166760			163280			29188		
Total	659	135450			178040			175810			35112		

Em relação ao fator estação, a diferença é explicada pelos valores do verão que diferiram do outono ($F=4,763$; $p=0,009$) e da primavera ($F=9,148$; $p=0,001$) (Fig 3a). O maior valor para biomassa em Barra Velha foi no inverno ($21,21 \pm 1,81$) e em Navegantes ($17,03 \pm 1,46$) e Itajaí ($14,47 \pm 0,85$) no verão (Fig 3a). Quanto ao fator praia, a diferença foi dada pelos maiores valores de biomassa na praia de Barra Velha em relação a Navegantes ($F=8,025$, $p=0,001$) e Itajaí ($F=7,903$, $p=0,001$) (Fig.3b).

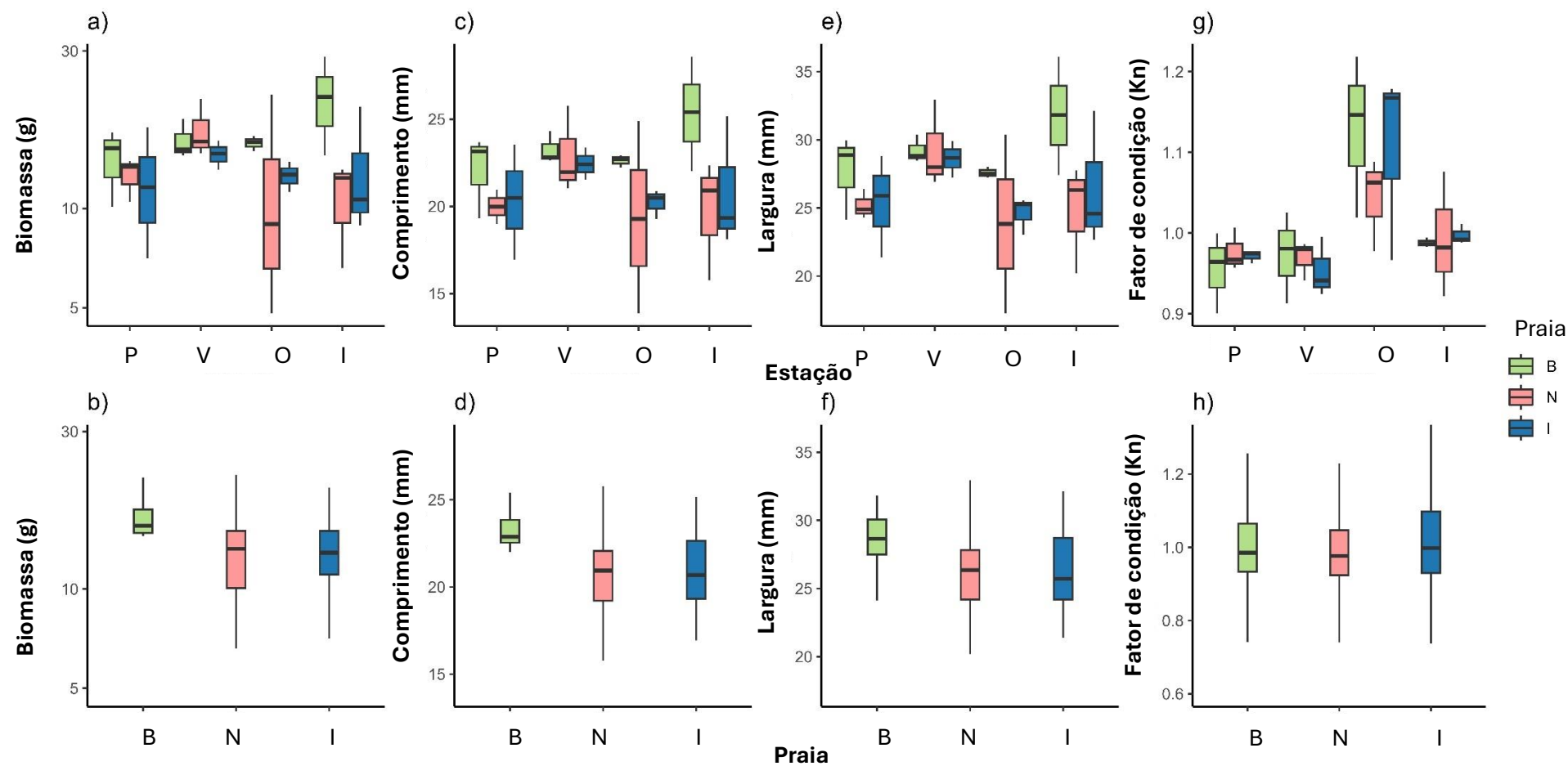


Fig. 3 – Os *boxplots* mostram a variação dos dados, com linhas verticais com intervalo total, limites da caixa que representam o quartil superior e o quartil inferior, uma linha horizontal que indica o valor mediano das características biológicas do caranguejo-fantasma: biomassa ('a' e 'b'), comprimento total ('c' e 'd'), largura ('e' e 'f') e fator de condição relativo - Kn ('g' e 'h') registrados para as estações do ano nas praias de Barra Velha (B), Navegantes (N) e Itajaí (I) no Sul do Brasil. Legenda: P = primavera, V= verão, O = outono, I = inverno.

O comprimento da carapaça (Cc) demonstrou diferenças significativas em relação ao fator estação ($F=4,8049$; $p=0,001$) e praia ($F=10,169$; $p=0,002$) (Tabela 2). A explicação sobre o fator estação foi devido aos valores do comprimento do verão diferirem do outono ($F= 9,017$; $p= 0,001$) e da primavera ($F= 10,49$; $p= 0,002$). Em Barra Velha o maior comprimento foi no inverno ($25,12\pm0,86$) e em Navegantes ($22,70\pm0,78$) e Itajaí ($22,36\pm0,46$) no verão (Fig 3c). Quanto ao fator praia, os maiores valores do Cc foram na praia de Barra Velha (Fig. 3d), que diferiu significativamente de Navegantes ($F= 14,74$; $p= 0,001$) e Itajaí ($F= 16,37$; $p= 0,001$).

A largura da carapaça (Lc) diferiu quanto ao fator estação ($F=6,7625$; $p=0,001$) e praia ($F=8,8706$; $p=0,006$). As diferenças entre as estações foram dadas pelos valores da Lc do verão que diferiu do outono ($F= 16,79$; $p= 0,001$) e da primavera ($F= 12,09$; $p= 0,003$). Em Barra Velha os maiores valores de Lc foi no inverno ($31,50\pm 1,12$) em Navegantes ($29,00\pm0,99$) e Itajaí ($28,49\pm0,61$) no verão (Fig.3e). Em relação as praias, Barra Velha registrou os maiores valores de Lc quanto a Navegantes ($F= 12,82$; $p= 0,0002$) e Itajaí ($F= 15,31$; $p= 0,0001$) (Fig. 3f).

Por último, o fator de condição relativo (Kn), diferiu significativamente apenas em relação a estação ($F=33,411$; $p=0,001$) (Fig. 3g,h). A explicação é dada pela diferença dos valores Kn no outono diferirem do inverno ($F= 35,76$; $p= 0,0001$), primavera ($F= 62,46$; $p= 0,0001$) e verão ($F= 83,26$; $p= 0,0001$) e do verão quanto ao inverno ($F= 4,939$; $p= 0,0161$). Os maiores valores de Kn foram na estação outono nas três praias, Barra Velha ($1,12\pm0,02$), Navegantes ($1,05\pm0,02$) e Itajaí ($1,14\pm0,02$). Assim, usando censo direto, a biomassa e o tamanho corporal (comprimento e largura da carapaça) foram maiores em Barra Velha, particularmente no inverno, enquanto Navegantes e Itajaí tiveram seus maiores valores no verão. Além disso, o fator de condição relativo foi maior no outono em todas as três praias.

Os modelos lineares generalizados (GLM) indicaram que a densidade de tocas variou significativamente ($p= 0,04$) em relação a área de vegetação nas praias (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados de Modelos Lineares Generalizados (GLM) testando as relações entre medidas de biomassa, comprimento e largura da carapaça, tocas médias por metro quadrado e fator de condição relativo com a área de vegetação das praias amostradas. Valores de p significativos em negrito

Densidade de toca				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercepto)	-1.3700	0.1402	-9.7740	<0.01
Vegetação (V)	0.0010	0.0005	2.0510	0.04
Itajaí (I)	-0.3662	0.2901	-1.2630	0.22
Navegantes (N)	-0.4682	0.2793	-1.6760	0.10
Biomassa				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercepto)	2.5513	0.0438	58.2600	<0.01
Vegetação (V)	0.0014	0.0002	9.0060	<0.01
Itajaí (I)	-0.5347	0.0892	-5.9930	<0.01
Navegantes (N)	-0.7526	0.0919	-8.1870	<0.01
Comprimento da carapaça				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercepto)	3.0550	0.0242	126.4460	<0.01
Vegetação (V)	0.0005	0.0001	5.3240	<0.01
Itajaí (I)	-0.2344	0.0458	-5.1210	<0.01
Navegantes (N)	-0.3101	0.0454	-6.8310	<0.01
Largura da carapaça				
	Estimate	Std. Error	t	Pr(> t)
(Intercepto)	3.2700	0.0254	128.9870	<0.01
Vegetação (V)	0.0005	0.0001	5.3090	<0.01
Itajaí (I)	-0.2347	0.0480	-4.8920	<0.01
Navegantes (N)	-0.2979	0.0475	-6.2740	<0.01
Fator de condição				
	Estimate	Std. Error	tvalue	Pr(> t)
(Intercepto)	-0.0887	0.0240	-3.6960	<0.01
Vegetação (V)	0.0005	0.0001	5.3080	<0.01
Itajaí (I)	0.0037	0.0432	0.0860	0.932
Navegantes (N)	0.0240	0.0419	0.5730	0.571

Assim, a área de vegetação influencia positivamente na densidade de tocas do caranguejo-fantasma em praias morfodinâmicas (Fig.4 a,f, k).

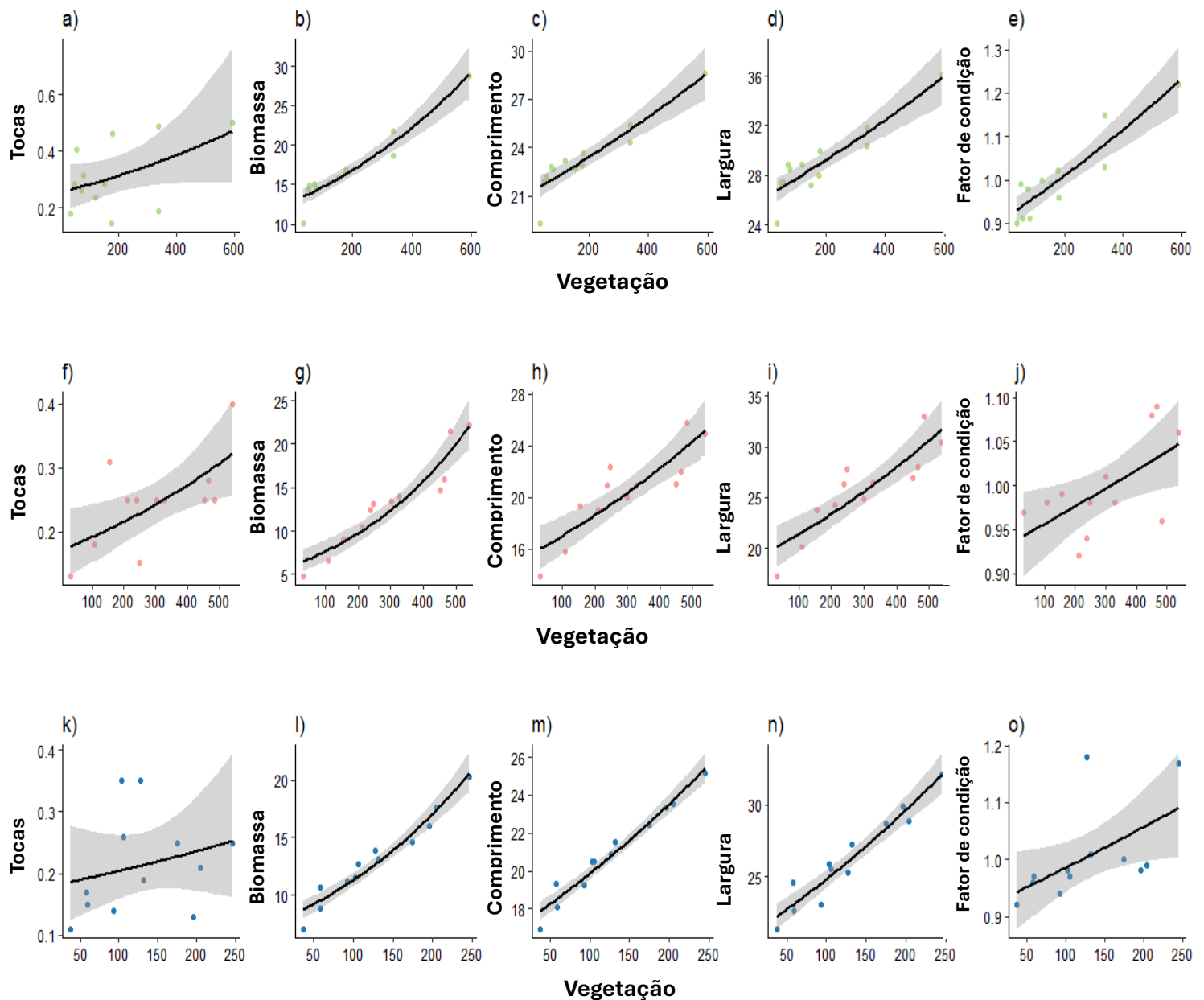


Fig. 4 – Modelos lineares generalizados (GLM) entre as medidas de características biológicas e a área de vegetação em praias arenosas. Legenda: Densidade de tocas (a, e, k), Biomassa (b, g, l), Comprimento da carapaça (c, h, m), Largura da carapaça (d, i, n) e Fator de condição relativo (e, j, o) de *Ocypode quadrata* nas praias de Barra Velha (B) (a – e), Navegantes (N) (f – j) e Itajaí (I) (k– o).

Vale destacar, que os valores da biomassa e do tamanho do caranguejo-fantasma (Cc, Lc) o aumento da vegetação também influenciou positivamente. A biomassa (Fig.4b, g, l), Cc (Fig.4 c, h, m) Lc (Fig.4 d, i, n) aumentaram significativamente ($p < 0.01$) em Barra Velha (Intercepto), Navegantes e Itajaí. Por último, o Kn do *O. quadrata* (Fig. 4 e,j, o) aumentou à medida que ampliou a área de vegetação. Observa-se na Fig. 4, uma

relação positiva entre as características biológicas do caranguejo-fantasma e a área da vegetação, demonstrando um notável aumento significativo desses indicadores biológicos à medida que a área da vegetação se expande.

4. Discussão

O presente estudo explorou as características biológicas do caranguejo *O. quadrata* em praias no sul do Brasil, evidenciando as complexas inter-relações entre essas características e a sazonalidade e a morfodinâmica de praias. Além disso, foi observado que a presença de vegetação influencia positivamente as características biológicas do caranguejo-fantasma. Dada a relevância desse crustáceo como indicador ecológico, é fundamental realizar uma análise mais abrangente que leve em conta fatores temporais e espaciais, como flutuações sazonais, morfodinâmica de praia e presença de vegetação. Até o momento, esses aspectos não foram examinados de forma interligada.

Em relação à densidade de tocas, foi observado uma maior densidade nos meses de outono e verão. Essa diferença sazonal documentada em outros estudos, registrou picos durante o outono-inverno (de Oliveira et al., 2016) e verão (Rosa e Borzone, 2008). Esse padrão é tipicamente associado ao recrutamento de juvenis para a população (Branco et al., 2010). Entre os diferentes tipos de praia, a praia refletiva apresentou maior densidade de tocas, confirmando os registros de Turra et al. (2005) e Rosa e Borzone (2008). Por outro lado, estudos de Lucrezi et al. (2015) e Pombo et al. (2017) documentaram maiores densidades de tocas em praias dissipativas. A relação exata entre a densidade de tocas do caranguejo-fantasma e o tipo de praia ainda não é clara, mas evidências sugerem que crustáceos intermareais, que vivem na zona intertidal tendem a apresentar aumento de densidade em direção às praias dissipativas, enquanto crustáceos do supralitoral (i.e., *Ocypode*) demonstram essa tendência em praias refletivas (Defeo e McLachlan, 2011).

Diferentemente de outros estudos, a presente pesquisa concentrou na amostragem durante os períodos de pico de atividade de caranguejos fantasmas no sul do Brasil (do Vale et al. 2022): noite no verão-primavera e dia no outono-inverno. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais precisa da densidade de tocas durante os períodos de maior atividade de caranguejos. Consequentemente, essa escolha metodológica pode explicar por que não detectamos diferenças significativas em relação às estações, praias e suas interações (estações vs. praias). Assim, a consistência da densidade de tocas ao longo do tempo, pode ser benéfica para monitorar mudanças de longo prazo.

Os aspectos biológicos do caranguejo, como a biomassa, o comprimento e a largura da carapaça, exibiram padrões sazonais similares. O processo de crescimento do animal é influenciado pelo metabolismo energético, que é moldado por fatores ambientais (Kucharski e Da Silva, 1991) e endógenos, como ciclo de muda, maturidade gonadal, época reprodutiva e alimentação (Oliveira et al., 2003; Schirf et al., 1987). Em relação a alimentação, o caranguejo-fantasma exibe uma dieta predominantemente animal, com preferência por insetos e crustáceos devido ao alto teor calórico (Wolcott, 1978), embora também consuma material vegetal (Wolcott, 1978; Rae et al., 2019; do Vale et al., 2022). No presente estudo, foi notado que os maiores valores de biomassa, comprimento e largura da carapaça ocorreu durante o inverno e verão, quando houve a maior ingestão de crustáceos, conforme documentado em nosso estudo anterior (do Vale et al., 2022). Assim, a alimentação exerceu um papel fundamental no padrão de crescimento caranguejo-fantasma (Feary et al., 2009; Gül e Griffen, 2020a).

É interessante notar que, apesar dos caranguejos da praia intermediária (Itajaí) terem registrado maiores plenitudes estomacais ao longo do ano (do Vale et al., 2022), os valores mais altos para biomassa, largura e comprimento da carapaça foram observados na praia refletiva (Barra Velha), que teve menor ingestão alimentar. Este padrão pode ser explicado pela hipótese de segurança de habitat (HSH), indicando que o tamanho do caranguejo em praias refletivas como Barra Velha, pode ser maior do que em praias intermediárias (Itajaí) e dissipativas (Navegantes) (Defeo e Gómez, 2005; Defeo e McLachlan, 2011). Essa descoberta ressalta a complexidade das interações entre hábitat, dieta e características do caranguejo-fantasma, indicando a necessidade de uma análise mais detalhada para compreender completamente esses padrões.

Em relação a condição corporal (Kn) do caranguejo *Ocypode*, detectamos diferenças sazonais, porém sem diferenças entre as praias morfodinâmicas. As flutuações na condição corporal em caranguejos são resultantes de: mudanças nas condições ambientais, disponibilidade de alimentos/comportamento de forrageamento, época reprodutiva (i.e, maturação das gônadas, desova) e ecdise (Hamid et al., 2018). Os resultados neste estudo, mostraram baixa condição corporal durante a estação primavera-verão, esse achado surpreendente contraria a expectativa de que a disponibilidade sazonal de alimentos, favorecida pelo aumento da presença de presas e resíduos deixados por banhistas, seria o principal impulsionador da melhor condição corporal do caranguejo-fantasma (Ocaña et al., 2016; Schlacher et al., 2007; Gül e Griffen, 2020a; do Vale et al.,

2022). Assim, a baixa condição corporal do *Ocypode* possivelmente está atribuída, à época reprodutiva e à ecdise, uma vez que esses fatores influenciam negativamente na condição corporal (Barbieri e Verani, 1987; Pinheiro e Taddei, 2005). É reconhecido que a reprodução do *O. quadrata* ocorre na primavera-verão (Branco et al., 2010), sendo esse período associado à possível ocorrência de ecdise, conforme registrado em outras espécies (Pinheiro et al., 2005; Pinheiro e Fiscarelli, 2009). Portanto, a época reprodutiva e a muda emergem como fatores-chave da diminuição na condição corporal do caranguejo.

A compreensão desses padrões biológicos é fundamental não apenas para decifrar os mecanismos subjacente às mudanças na biologia do caranguejo-fantasma, mas também para o emprego adequado como bioindicador, principalmente em épocas diferentes do ano e/ou diferentes praias morfodinâmicas. Estudos anteriores destacaram a densidade de tocas e a condição corporal, como indicadores importantes para avaliar as alterações nos padrões de vida em resposta às perturbações humanas (Gül e Griffen, 2020a, 2020b; Costa et al., 2020a, Costa et al., 2022a, 2022b). Assim, uma compreensão abrangente das variações sazonais das características biológicas do caranguejo-fantasma (densidade de tocas, biomassa, comprimento, largura da carapaça e condição corporal) é fundamental para aplicar como um bioindicador confiável, minimizando possíveis vieses e aprimorando sua aplicabilidade para a gestão em ambientes de praias.

Ao considerar a influência da vegetação costeira, confirmamos a hipótese que as características de *O. quadrata* são afetados positivamente à medida que aumenta a área de vegetação em praias morfodinâmicas. Este resultado está alinhado com estudos que destacaram a importância da vegetação costeira como um ambiente saudável para o caranguejo-fantasma (Schlacher et al., 2011; Barboza et al., 2021). Este crustáceo desempenha um papel ecológico fundamental, como espécie guarda-chuva e conecta a teia alimentar do ecossistema marinho com o terrestre (Costa e Zalmon, 2021; do Vale et al., 2022). Assim, nossas descobertas confirmam a importância da preservação da vegetação para a saúde do caranguejo-fantasma e, consequentemente, para a sobrevivência de outras espécies. Portanto, o presente estudo evidencia a urgente na elaboração de estratégias voltadas para a conservação do ecossistema de praias arenosas. Esta abordagem ampla é essencial para garantir a sustentabilidade das populações do caranguejo *Ocypode* e para as demais espécies, frente as pressões antrópicas crescentes e das mudanças ambientais extremas.

A degradação ambiental em praias arenosas, impulsionada pelo desenvolvimento urbano local e mudanças climáticas, tem contribuído para o 'aperto costeiro', que diminui a área de praia pela elevação do nível do mar e pela urbanização intensiva (Schlacher et al., 2006, 2007; Defeo e Elliot, 2021). A urbanização exerce influência na configuração das dunas e na vegetação das praias, afeta diretamente na qualidade do habitat do caranguejo-fantasma (Schlacher et al., 2011). Assim, a confirmação da hipótese, reforça a ligação intrínseca entre impacto ambiental, representada pelo 'aperto costeiro' refletindo nas características biológicas do *O. quadrata*. O presente estudo serve como base para futuras elaborações de políticas públicas voltadas a proteção da vegetação de praias e dunas, uma vez que essa degradação impacta diretamente um dos bioindicadores (caranguejo-fantasma) mais utilizados em praias arenosas (Barros et al., 2001; Noriega et al., 2012; Pombo et al., 2023). As diferenças na densidade de tocas e nos aspectos biológicos do *O. quadrata* em praias com diferentes níveis de urbanização indicam que a preservação da vegetação é vital para garantir ambientes saudáveis para esse crustáceo e para a diversidade ecológica (Cardoso et al., 2016; Orlando et al., 2020), independentemente da estação ou do tipo de praia.

A utilização do caranguejo-fantasma como bioindicador, pelo método indireto e/ou direto, deve levar em consideração as características biológicas considerando as flutuações sazonais e a morfodinâmica da praia para fornecer dados precisos e confiáveis. Desta forma, a compreensão das variações temporais na biomassa, no comprimento/largura da carapaça e condição corporal do *O. quadrata* são fundamentais para otimizar a eficácia desse crustáceo como indicador ambiental de praias arenosas. Estudos anteriores corroboram que áreas mais antropizadas e com menor vegetação, resultam em condições menos favoráveis para o *O. quadrata*, impactando negativamente em sua condição corporal (Lucrezi et al., 2010; Gül e Griffen, 2020a; Costa et al., 2022a).

5. Conclusão

O presente estudo enfatiza a importância de identificar as variações em relação aos fatores ambientais temporais (estação) e espaciais (tipo de praia) para usar o caranguejo como um bioindicador de forma eficaz. A falta de variação na densidade de tocas (censo indireto) sugere que pode ser útil para monitorar mudanças de longo prazo. Características obtidas por censo direto, como biomassa e tamanho do corpo (comprimento e largura da carapaça), são sensíveis a mudanças sazonais e aos tipos de praia, assim devem ser consideradas esses fatores para evitar viés ao usá-lo como um

bioindicador. Em contraste, o fator de condição relativa (Kn) não mostra variação entre diferentes tipos de praia, o que pode torná-lo uma medida confiável para monitorar praias com diferentes morfologias. Os fatores sazonais, como recursos alimentares, ciclos reprodutivos e muda, influenciam a biologia do caranguejo, oferecendo perspectivas sem precedentes na literatura científica. Assim, as características biológicas podem ser um indicador de impacto humano em praias, pela correlação negativa das características biológicas com a diminuição da vegetação. Tais descobertas ressaltam a importância da preservação da vegetação costeira, que desempenha um papel vital na saúde dos ecossistemas de praias arenosas. No contexto da gestão costeira, usar dados empíricos para abordar a atividade humana intensa é essencial para a conservação e mitigação de impactos, beneficiando não apenas *Ocypode*, mas também a biodiversidade dos ecossistemas costeiros.

Referências

- Anderson, M. J., 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecol.* 26, 32–46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>.
- Augusto, M., Abude, R. R., Cardoso, R. S., Cabrini, T. M., 2023. Local urbanization impacts sandy beach macrofauna communities over time. *Front. Mar. Sci.* 10, 1158413 DOI:10.3389/fmars.2023.1158413.
- Barboza, C.A.M., Mattos, G., Soares-Gomes, A., Zalmon, I.R., Costa, L.L., 2021. Low densities of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* related to large scale human modification of sandy shores. *Front. Mar. Sci.* 8, 103. doi: 10.3389/fmars.2021.589542.
- Barros, F., 2001. Ghost crabs as a tool for rapid assessment of human impacts on exposed sandy beaches. *Biol. Conserv.* 97 (3), [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00116-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00116-6).
- Barbieri, G., Verani, J. R., 1987. O fator de condição como indicador do período de desova em *Hypostomus aff. plecostomus* (Linnaeus, 1758) (Osteichthyes, Loricariidae), na represa do Monjolinho (São Carlos, SP). *Ciência e Cultura* 39 (7), 655-658.
- Branco, J. O., Hillesheim, J. C., Fracasso, H.A.A., Christoffersen, M. L., Evangelista C. L., 2010. Bioecology of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) (Crustacea: Brachyura) compared with other intertidal crabs in the southwestern Atlantic. *J. Shellfish Res.* 29 (2), 503–512. <https://doi.org/10.2983/035.029.0229>.
- Costa, L. L., Zalmon, I. R., Fanini, L., Defeo, O., 2020a. Macroinvertebrates as indicators of human disturbances on sandy beaches: A global review. *Ecol. Indic.* 118, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106764>.
- Costa, L. L., Secco, H., Arueira, V. F., Zalmon, I. R., 2020b. Mortality of the Atlantic ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) due to vehicle traffic on sandy

- beaches: A road ecology approach. *J. Environ. Manag.* 260, 110168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110168>
- Costa, L. L., Zalmon, I. R., 2021. Macroinvertebrates as umbrella species on sandy beaches. *Biol. Conserv.* 253, 108922. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108922>.
- Costa, L. L., Arueira, V. F., Ocaña, F. A., Soares-Gomes, A., Zalmon, I. R., 2022a. Are ghost crabs (*Ocypode* spp.) smaller on human-disturbed sandy beaches? A global analysis. *Hydrobiologia*, 849(15), 3287-3298. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04900-1>.
- Costa, L. L., Fanini, L., Zalmon, I. R., Defeo, O., McLachlan, A. 2022b. Cumulative stressors impact macrofauna differentially according to sandy beach type: a meta-analysis. *J. Environ. Manag.*, 307, 114594.
- Checon, H. H., Corte, G. N., Esmaeili, Y. S., Laurino, I. R. A., Turra, A. 2023. Sandy beach bioindicators: how each benthic taxon tells its own story. *Ocean Coast. Manag.* 240, 106645. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106645>
- Dale, V.H., Beyeler, S.C., 2001. Challenges in the development and use of ecological indicators. *Ecol. Indic.* 1 (1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/S1470-160X\(01\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(01)00003-6).
- de Souza, G.N., Oliveira, C.A.G., Tardem, A.S., Soares-Gomes, A., 2017. Counting and measuring ghost crab burrows as a way to assess the environmental quality of beaches. *Ocean Coast Manag.* 140, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.02.007>.
- Defeo, O., Elliott, M., 2021. The ‘triple whammy’ of coasts under threat—Why we should be worried!. *Mar. Pollut. Bull.* 163(C), 111832. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111832>.
- Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D. S., Schlacher, T. A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M., Scapini, F., 2009. Threats to sandy beach ecosystems: a review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 81(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>.
- Defeo, O., McLachlan A., 2011. Coupling between macrofauna community structure and beach type: a deconstructive meta-analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 433, 29-41. <https://doi.org/10.3354/meps09206>.
- Elliott, M., Day, J.W., Ramachandran, R., Wolanski, E., 2019. Chapter 1 - a synthesis: what future for coasts, estuaries, deltas, and other transitional habitats in 2050 and beyond? In: Wolanski, E., Day, J.W., Elliott, M., Ramachandran, R. (Eds.), *Coasts and Estuaries: the Future*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1–28.
- de Oliveira, C.A.G., Souza, G.N., Soares-Gomes, A., 2016. Measuring burrows as a feasible non-destructive method for studying the population dynamics of ghost crabs. *Mar. Biodivers.* 46, 809–817. <https://doi.org/10.1007/s12526-015-0436-3>.
- do Vale, J.G., Barrilli, G.H. C., Chahad-Ehlers, S., Branco, J.O., 2022. Factors Influencing the Feeding Habits of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) on Subtropical Sandy Beaches. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 269, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107817>.

- Fanini, L., Defeo, O., Elliott, M., 2020. Advances in sandy beach research – local and global perspectives. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 234, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106646>.
- Fleishman, E., Blair, R. B., and Murphy, D. D., 2001. Empirical validation of a method for umbrella species selection. *Ecol. Appl.* 11 (5), 1489–1501. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1489:EVOAMF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1489:EVOAMF]2.0.CO;2).
- Froese, R., 2006. Cube law, condition factor and weight–length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *J. Appl. Ichthyol.* 22 (4), 241–253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>.
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2019. Combined impacts of natural and anthropogenic disturbances on the bioindicator *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 519, 151185. doi: 10.1016/j.jembe.2019.151185
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2020a. Diet, energy storage, and reproductive condition in a bioindicator species across beaches with different levels of human disturbance. *Ecol. Indic.* 117, 106636. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106636>.
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2020b. Changes in claw morphology of a bioindicator species across habitats that differ in human disturbance. *Hydrobiologia* 847(14), 3025–3037. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04308-9>.
- Kucharski, L.C.R., Da Silva, R.S.M., 1991. Effect of diet composition on the carbohydrate and lipid metabolism in an estuarine crab *Chasmagnathus granulata* (DANA, 1851). *Comp. Biochem. Physiol.* 99(1-2), 215–218. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(91\)90261-A](https://doi.org/10.1016/0300-9629(91)90261-A).
- Hobbs, C. H., Landry, C. B., Perry, J. E., 2008. Assessing anthropogenic and natural impacts on ghost crabs (*Ocypode quadrata*) at Cape Hatteras National Seashore, North Carolina. *J. Coast. Res.* 24 (6), 1450–1458. doi:10.2112/07-0856.1.
- Jonah, F. E., Agbo, N. W., Agbeti, W., Adjei-Boateng, D., Shimba, M. J. 2015. The ecological effects of beach sand mining in Ghana using ghost crabs (*Ocypode species*) as biological indicators. *Ocean Coast, Manag.* 112, 18–24.
- Le Cren, E. D., 1951. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *J. Anim. Ecol.* 20 (2), 201–219. <https://doi.org/10.2307/1540>.
- Laurino I. R. A., Checon H. H., Corte G. N., Turra A. 2022. Does coastal armoring affect biodiversity and its functional composition on sandy beaches? *Mar. Environ. Res.* 181, 105760. doi: 10.1016/j.marenvres.2022.105760
- Lindenmayer, D.B., 1999. Future directions for biodiversity conservation in managed forests: indicator species, impact studies and monitoring programs. *For. Ecol. Manag.* 115 (2-3), 277–287. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00406-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00406-X).
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., Robinson, W., 2010. Can storms and shore armouring exert additive effects on sandy-beach habitats and biota? *Mar. Freshw. Res.* 61 (9), 951–962. <https://doi.org/10.1071/MF09259>.
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., 2014. The ecology of ghost crabs- a review. *Oceanogr. Mar. Biol.* 52, 201–256.

- Hamid, A., Batu, D. T. L., Riani, E., Wardiatno, Y., 2018. Carapace width-weight relationships and condition factor of blue swimming crab, *Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758 (Crustacea: Decapoda) in Lasongko Bay, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Adv. Environ. Biol.*, 12 (11), 14-21. 10.22587/aeb.2018.12.11.2
- Machado, P. M., Tavares, D. C., Zalmon, I. R. 2019. Synergistic effect of extreme climatic events and urbanization on population density of the ghost crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *Marine Ecology*, 40(2), e12525. <https://doi.org/10.1111/maec.12525>
- McLachlan, A., Brown, A. C., 2010. *The ecology of Sandy Shores*. Second ed. Elsevier Academic Press.
- McLachlan, A., Defeo, O., 2018. *The Ecology of Sandy Shores*, third ed. Elsevier Academic Press, London. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04773-6>.
- Niemi, G.J., McDonald, M.E., 2004. Application of ecological indicators. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35, 89–111. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.112202.130132>.
- Ocaña, F.A., de Jesús-Navarrete, A., de Jesús-Carrillo, R.M., Oliva-Rivera, J.J., 2016. Efectos del disturbio humano sobre la dinámica poblacional de *Ocypode quadrata* (Decapoda: Ocypodidae) en playas del Caribe Mexicano. *Rev. Biol. Trop.* 64 (4), 1625-1641. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v64i4.19909>.
- Ocaña, F. A., A. de Jesús-Navarrete, H. A. Hernández-Arana, 2020. Co-occurring factors affecting ghost crab density at four sandy beaches in the Mexican Caribbean. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 36, 101310. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101310>.
- Oliveira, G.T., Fernandes, F.A., Bond-Buckup, G., Bueno, A.A., Da Silva, R.S.M., 2003. Circadian and seasonal variations in the metabolism of carbohydrates in *Aegla ligulata* (Crustacea: Anomura: Aeglidae). *Mem. Mus. Vic.* 60 (1), 59–62. <http://doi.org/10.24199/j.mmv.2003.60.8>.
- Orlando, L., Ortega, L., and Defeo, O., 2020. Urbanization effects on sandy beach macrofauna along an estuarine gradient. *Ecol. Indic.* 111, 106036. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106036>.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., et al., 2020. *vegan: Community ecology package*. R package version 2, 5–7. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pinheiro, M. A. A., Taddei, F. G., 2005. Relação peso/largura da carapaça e fator de condição em *Dilocarcinus pagei* Stimpson (Crustacea, Trichodactylidae), em São José do Rio Preto, São Paulo, Brasil. *Rev. Bras. Zool.* 22, 825-829. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752005000400002>.
- Pinheiro, M.A.A.; Fiscarelli, A.G.; Hattori, G.Y., 2005. Growth of the mangrove crab *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763) (Brachyura: Ocypodidae) at Iguape, SP, Brazil. *J. Crust. Biol.* 25 (2), 293-301. <https://doi.org/10.1651/C-2438>.
- Pinheiro, M. A. A., Fiscarelli, A. G., 2009. Length-weight relationship and condition factor of the mangrove crab *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763) (Crustacea, Brachyura, Ucididae). *Braz. Arch. Biol. Technol.* 52 (2), 397-406. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000200017>.

- Pombo, M., Turra, A. 2013. Issues to be considered in counting burrows as a measure of Atlantic ghost crab populations, an important bioindicator of sandy beaches. *PLoS One*, 8(12), e83792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083792>
- Pombo, M., De Oliveira, A.L., Xavier, L.Y., Siegle, E., Turra, A., 2017. Natural drivers of distribution of ghost crabs *Ocypode quadrata* and the implications of estimates from burrows. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 565, 131–147. <https://doi.org/10.3354/meps11991>.
- Pombo, M., Cornwell, T., Turra, A. 2023. Beach morphodynamics modulate the effects of multidirectional habitat loss on population density and size structure of the Atlantic ghost crab *Ocypode quadrata*. *Mar. Environ. Res.* 190, 106107. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106107>.
- R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>.
- Rae, C., Hyndes, G. A., Schlacher, T. A., 2019. Trophic ecology of ghost crabs with diverse tastes: Unwilling vegetarians. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 224, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.023>.
- Rosa, L. C. D., Borzone, C. A. 2008. Spatial distribution of the *Ocypode quadrata* (Crustacea: Ocypodidae) along estuarine environments in the Paranaguá Bay Complex, southern Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, 25, 383–388.
- Sakai, K., Türkay, M., 2013. Revision of the genus *Ocypode* with the description of a new genus, *Hoplocypode* (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Mem. Queensl. Mus.* 56 (2), 665–793.
- Schirf, V.R., Turner, L.S., Hanapel, C., De La Cruz, P., Dehn, P.F., 1987. Nutritional status and energy metabolism of crayfish (*Procambarus clarkii*, GIRARDI) muscle and hepatopancreas. *Comp. Biochem. Physiol.*, A 88 (3), 383–386. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(87\)90050-8](https://doi.org/10.1016/0300-9629(87)90050-8)
- Schlacher, T.A., Thompson, L., Price, S., 2007. Vehicles versus conservation of invertebrates on sandy beaches: mortalities inflicted by off-road vehicles on ghost crabs. *Mar. Ecol.* 28 (3), 354–367. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2007.00156.x>.
- Schlacher, T. A., De Jager, R., Nielsen, T., 2011. Vegetation and ghost crabs in coastal dunes as indicators of putative stressors from tourism. *Ecol. Indic.* 11(2), 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.05.006>.
- Schlacher, T. A., Schoeman, D. S., Jones, A. R., Dugan, J. E., Hubbard, D. M., Defeo, O., et al., 2014. Metrics to assess ecological condition, change, and impacts in sandy beach ecosystems. *J. Environ. Manag.* 144, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.036>.
- Schlacher, T.A., Lucrezi, S., Connolly, R.M., Peterson, C.H., Gilby, B.L., Maslo, B., Olds, A.D., Walker, S.J., Leon, J.X., Huijbers, C.M., Weston, M.A., Turra, A., Hyndes, G.A., Holt, R.A., Schoeman, D.S., 2016. Human threats to sandy beaches: a meta-analysis of ghost crabs illustrates global anthropogenic impacts. *Estuar. Coast. Shelf. S.* 169, 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.11.025>.

- Siddig, A.A.H., Ellison, A.M., Ochs, A., Villar-Leeman, C., Lau, M.K., 2016. How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in ecological indicators. *Ecol. Indic.* 60, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.036>.
- Simberloff, D. 1998. Flagships, umbrellas, and keystones: is single-species management passé in the landscape era?. *Biological conservation*, 83 (3), 247-257. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(97\)00081-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(97)00081-5)
- Suciu, M. C., Tavares, D. C., and Zalmon, I. R., 2018. Comparative evaluation of crustaceans as bioindicators of human impact on Brazilian sandy beaches. *J. Crustac Biol.* 38 (4), 420–428. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruy027>
- Tewfik, A., Bell, S. S., McCann, K. S., Morrow, K., 2016. Predator diet and trophic position modified with altered habitat morphology. *PLoS One*, 11, e0147759. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147759>.
- Wolcott, T. G., 1978. Ecological role of ghost crabs, *Ocypode quadrata* (Fabricius) on an ocean beach: scavengers or predators? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 31 (1), 67-82. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(78\)90137-5](https://doi.org/10.1016/0022-0981(78)90137-5).
- Worm, B., Barbier, E. B., Beaumont, N., Duffy, J. E., Folke, C., Halpern, B. S., et al., 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *science*, 314 (5800), 787-790. doi/10.1126/science.1132294.
- Zar, J. H., 2010. *Biostatistical Analysis*. 5th Edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Material Suplementar

Tabela S1 – Valores médios e desvio padrão das variáveis ambientais registradas em Barra Velha (B), Navegantes (N) e Itajaí (I) no período de março de 2017 a fevereiro de 2018

Estação	Local	Ar (°C)	Areia (°C)	Água (°C)	Salinidade (%)	Areia (%)
Primavera	Barra Velha	23,0±2,45	26,8±2,32	22,5±0,84	34,3±1,15	3,8±2,46
	Navegantes	22,9±1,28	28,2±1,17	23,2±0,41	33,3±1,15	5,2±1,79
	Itajaí	21,0±1,82	25,4±1,74	22,5±0,45	34,7±0,58	2,9±0,72
Verão	Barra Velha	28,8±1,17	28,3±1,21	26,2±0,75	32,3±0,58	3,2±0,66
	Navegantes	25,2±0,75	26,3±1,51	25,7±0,52	27,0±5,29	11,5±4,89
	Itajaí	24,2 ±2,48	25,5±2,95	24,7±0,52	31,7±1,53	3,6±0,29
Outono	Barra Velha	19,7±3,19	20,3±2,23	21,4±2,06	30,3±2,08	5,5±1,27
	Navegantes	21,3±1,21	20,9±1,11	21,8±2,19	28,5±5,89	6,7±2,10
	Itajaí	21,9 ±2,54	22,3±2,42	21,8±2,32	33,0±2,65	3,6±0,37
Inverno	Barra Velha	18,6±3,47	22,7±3,14	19,8±0,88	35,0±0	3,5±0,29
	Navegantes	18,1±2,01	20,7±2,07	20,0±0,55	32,0±5,29	3,8±0,64
	Itajaí	19,8±2,25	22,2±1,75	20,2±0,41	34,0±1,73	2,8±0,53

Tabela S2 – Dados biológicos do *Ocypode quadrata* capturados entre março de 2017 e fevereiro de 2018 nas praias de Barra Velha, Navegantes e Itajaí. Amplitude, média, erro padrão da biomassa, comprimento, largura da carapaça e fator de condição relativo

		Dados Biológicos							
	Local		Biomassa (g)		Comprimento da carapaça (mm)		Largura da carapaça (mm)		Fator de condição relativo (Kn)
Primavera	Barra Velha	0,86-42,13	14,56 ± 9,95	10,03-33,75	22,30 ± 5,40	12,30-41,37	28,0 ± 6,66	0,69-1,20	0,96 ± 0,10
	Navegantes	0,39-44,90	12,58±11,68	7,66-35,59	19,98±7,52	9,46-42,86	25,19±9,44	0,55-1,24	0,97±0,12
	Itajaí	0,25-37,70	11,53±10,20	6,19-35,40	19,98 ± 6,80	7,85-39,42	24,97±7,98	0,73-1,14	0,97±0,09
Verão	Barra Velha	2,69-44,44	14,77± 9,19	15,61-36,09	22,72 ± 4,79	18,38-42,26	28,50 ± 6,03	0,66-1,24	0,94 ± 0,11
	Navegantes	0,15-49,78	17,03±12,79	3,63-34,94	22,70 ± 6,81	5,87-45,01	29,00 ± 8,66	0,73-1,53	0,97 ± 0,14
	Itajaí	0,13-45,26	14,47 ± 8,37	5,67-33,56	22,36±4,58	6,73-43,22	28,49±6,03	0,23-1,14	0,95 ± 0,11
Outono	Barra Velha	0,92-43,76	15,52±10,57	10,48-32,95	22,51 ± 5,16	13,17-40,87	27,48 ± 6,21	0,75-1,61	1,12 ± 0,17
	Navegantes	0,08-45,64	14,11±12,95	4,83-34,72	20,48±9,62	5,61-43,04	25,17±9,62	0,74-1,37	1,05 ± 0,13
	Itajaí	0,10-46,53	12,48±9,55	4,79-33,69	20,10±6,66	5,90-39,40	24,32 ± 7,75	0,31-1,57	1,14 ± 0,19
Inverno	Barra Velha	0,44-45,96	21,21±12,43	7,27-34,41	25,12 ± 6,15	9,43-42,80	31,50±12,43	0,72-1,10	0,98 ± 0,07
	Navegantes	0,29-33,36	10,24 ± 7,41	7,04-30,53	19,24 ± 5,78	8,38-37,92	24,26 ± 7,44	0,65-1,37	0,99± 0,14
	Itajaí	0,37-40,00	12,51±10,33	7,23-32,50	20,15 ± 6,56	8,76-41,50	25,47±8,42	0,81-1,23	1,00±0,08
Total	Barra Velha	0,44-45,96	16,77±10,88	7,27-36,09	23,26±5,49	9,43-42-80	28,97±6,78	0,66-1,61	1,01 ± 0,02
	Navegantes	0,08-49,78	14,42±12,13	3,63-35,59	21,10±7,22	5,61-45,01	26,60±9,06	0,55-1,53	0,99±0,13
	Itajaí	0,10-46,53	13,06±9,38	4,79-35,40	20,94±6,02	5,90-43,22	26,19±7,48	0,23-1,57	1,01±0,15

Capítulo III. Efeitos da ingestão de meso(micro)plásticos na dieta e no crescimento do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) em praia arenosa subtropical



Efeitos da ingestão de meso(micro)plásticos na dieta e no crescimento do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) em praia arenosa subtropical

Resumo

Os ecossistemas costeiros enfrentam desafios devido à poluição por plásticos, com impactos especialmente em praias arenosas pelo mundo. No entanto, poucos estudos abordam os efeitos da ingestão de meso e microplásticos por invertebrados nesse ambiente. Neste estudo, investigamos a dieta do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata*, uma espécie-chave que conecta as teias alimentares marinha e terrestre. Avaliamos a influência da ingestão de plásticos na composição alimentar e no crescimento corporal, com medições de biomassa e do fator de condição. As coletas foram realizadas em uma praia subtropical do Brasil, a praia da Lagoa da Barra Velha, e a análise do conteúdo estomacal revelou uma dieta diversificada, composta principalmente por insetos, material vegetal e crustáceos. Os plásticos identificados incluíram microfibras e fragmentos de plástico mole. O índice de importância alimentar (IAi) mostrou que o consumo de plástico alterou a preferência alimentar de *O. quadrata*, com uma redução significativa do IAi em categorias alimentares como Insecta e Material Vegetal. Contudo, a quantidade de plástico ingerida não causou redução da biomassa e no fator de condição. Além disso, não encontramos relação entre a prevalência de plástico no estômago quando considerado a distância da foz do rio, o grau de urbanização e a repleção estomacal. Assim, este estudo demonstra que a contaminação por plástico pode provocar efeitos subletais em *O. quadrata* e afetar papel ecológico, além de causar um desequilíbrio na teia alimentar do ecossistema costeiro. A alteração na dieta devido à ingestão de plástico sugere um bom indicador de perturbação humana em praias, ressaltando a urgência de realizar pesquisas adicionais e implementar políticas eficazes de gestão de resíduos para a saúde em praias arenosas.

Palavras-chave: Poluição plástica, Praias, *Ocypode*, Ecossistemas costeiros, Alimentação

1. Introdução

A crescente poluição plástica representa uma ameaça global à vida aquática e terrestre, e desafia os esforços de gestão de resíduos devido à sua persistência (Auta et al., 2017). Este desafio é particularmente relevante para as zonas costeiras e marinhas, pois impacta drasticamente esses ecossistemas e sua biodiversidade (Haarr et al., 2022). A entrada de resíduos em águas oceânicas ocorre por fontes terrestres, sendo transportados direta ou indiretamente pelas bacias hidrográficas, além das ações dos ventos, ondas, correntes e marés (Corcoran et al., 2009; Gracia et al., 2018).

Esses resíduos depositam-se nos ecossistemas costeiros, especialmente nos sedimentos de praias arenosas urbanizadas e preservadas, o que indica uma deficiência na gestão de resíduos e uma baixa taxa de reciclagem (Jambeck et al., 2015). As praias são, portanto, ambientes altamente expostos tanto aos mesoplásticos (5–25mm) quanto aos microplásticos (1 μ m–5 mm; MPs) (García-Regalado et al., 2024), que se dividem em duas categorias: i) microplásticos primários, como as microesferas usadas em produtos de higiene pessoal e medicamentos (Carr et al., 2016; Corradini et al., 2019) e ii) microplásticos secundários, provenientes da degradação de grandes fragmentos de plásticos (e.g., embalagem; roupas; artigos de pescas) por processos como fotodegradação e abrasão mecânica (Andrady, 2011; Zhang et al., 2021).

A biodisponibilidade de partículas plásticas em praias arenosas possibilita a interação e a ingestão desses resíduos por organismos presentes desde a zona intertidal até a supralitoral e dunas, principalmente nas áreas mais urbanizadas e próximas às descargas fluviais (Costa et al., 2023; Jankauskas et al., 2024). Embora o consumo de meso – e microplásticos e seus efeitos em organismos marinhos em águas oceânicas e costões rochosos têm sido cada vez mais estudados, as pesquisas na área supralitoral das praias ainda são limitadas (Iannilli et al., 2018; McGregor e Strydom 2020; Truchet et al., 2021).

Sabe-se que a ingestão de plásticos por organismos provoca múltiplos efeitos adversos, como alterações metabólicas e comportamentais (e.g., forrageamento) que reduzem a ingestão de alimentos devido à falsa saciedade. Como consequência, há uma diminuição da energia disponível, o que compromete o crescimento e a reprodução, refletindo na condição corporal dos indivíduos expostos (Watts et al., 2015; de Barros et al., 2020; Urbina et al., 2023). Além disso, a ingestão de plásticos pode resultar em efeitos subletais devido à modificação alimentar (de Barros et al., 2020) e em efeitos tóxicos letais, que causam a mortalidade dos indivíduos e à redução populacional (Shore et al.,

2021). A longo prazo, isso pode causar sérias alterações na composição ecológicas desses ecossistemas.

A presença de plástico na cadeia alimentar da macrofauna em praias arenosas pode provocar desequilíbrios para as espécies e as interações ecológicas (Tosseto et al., 2016; Carrasco et al., 2019). Esses organismos desempenham papéis ecológicos fundamentais no processo de ciclagem de nutrientes e matéria orgânica, além de participarem da complexa rede trófica entre o ambiente marinho e terrestre (McLachlan e Dorvlo 2005; Lucrezi et al., 2014). Nessa zona de transição, os organismos mais suscetíveis à ingestão de plásticos são os peixes pelágicos da zona de arrebentação e os macroinvertebrados do supralitoral, destacando-se o caranguejo azul e o caranguejo-fantasma pela diversidade de morfotipos plásticos ingeridos (Costa et al., 2023).

Em praias arenosas o maior crustáceo, o caranguejo-fantasma (gênero: *Ocypode*), possui alta plasticidade trófica e se alimenta de algas, insetos e crustáceos, por meio de diversas estratégias (Gomes et al., 2019; Rae et al., 2019). Reconhecido como o principal animal na transferência de energia marinha para as teias alimentares das praias e dunas (Wolcott; 1978; Tewfik et al., 2016), o caranguejo-fantasma também tem sido estudado como bioindicador antropogênico nos ecossistemas de praias arenosas pelo mundo (Gül e Griffen, 2019; Barboza et al., 2021). Devido à sua variabilidade e complexidade nas estratégias de vida e alimentação, os caranguejos são considerados espécies sentinelas em estudos sobre a ingestão de plásticos (de Barros et al., 2020; Multisanti et al., 2022; Pichardo-Casales et al., 2024).

Portanto, as análises do conteúdo estomacal dos caranguejos são fundamentais para compreender como os detritos plásticos são incorporados na alimentação, qual é o efeito na dieta e se podem ser considerados uma presa ou item alimentar (Blaber, 2000; Dantas et al., 2015; do Vale et al., 2022). Pesquisas indicam que o caranguejo-fantasma consome ativamente itens plásticos (Costa et al., 2019a,b). No entanto, ainda não há estudos sobre os efeitos subletais da ingestão de plásticos que acometem o comportamento de forrageamento, a composição da dieta, e no crescimento corporal (biomassa) e a condição corporal. No presente estudo, foi avaliado esses impactos no caranguejo *Ocypode quadrata* em uma praia arenosa no sul do Brasil. Esse crustáceo, apresenta principalmente um hábito alimentar detritívoro oportunista e em praias arenosas refletivas, sua alimentação é influenciada por fatores sazonais (do Vale et al., 2022), que influenciam significativamente na disponibilidade de itens alimentares em sua dieta.

O presente estudo teve como objetivo verificar se o padrão da dieta do caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1783), em uma praia arenosa refletiva no sul do Brasil, é alterada pela ingestão de plástico. Especificamente, buscou-se investigar três aspectos principais: o primeiro se o consumo de plásticos influencia o consumo de itens alimentares naturais; segundo, se a ingestão de plásticos afeta a biomassa e a condição corporal dos indivíduos, e se o volume de plástico teria efeito nesses dois fatores; e, finalmente, se a presença de plásticos no conteúdo estomacal está relacionada a fatores ambientais e endógeno. As hipóteses são: (1) que o consumo de plásticos reduz o consumo de alimentos naturais; (2) que o volume plástico ingerido cause a falsa saciedade, bloqueio intestinal, desnutrição e, conseqüentemente, redução da biomassa e da condição corporal; e (3) que fatores ambientais e endógeno, como a distância do rio, o grau de urbanização e a repleção estomacal, influenciam na presença de plásticos na dieta de *O. quadrata*.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido na Praia da lagoa de Barra Velha, localizada no município de Barra Velha (26°34'56,64" - 26°37'37,70" S; 48°39'55,38" - 48° 40'49,12" W) (Fig. 1), caracterizada por um clima subtropical, a morfodinâmica desta praia é classificada como refletiva (do Vale et al., 2022) e se estende por 6 km, com rio Itapocú desembocando e uma extensa área de vegetação preservada. Do outro lado, encontram-se áreas residenciais com menos cobertura de vegetação.

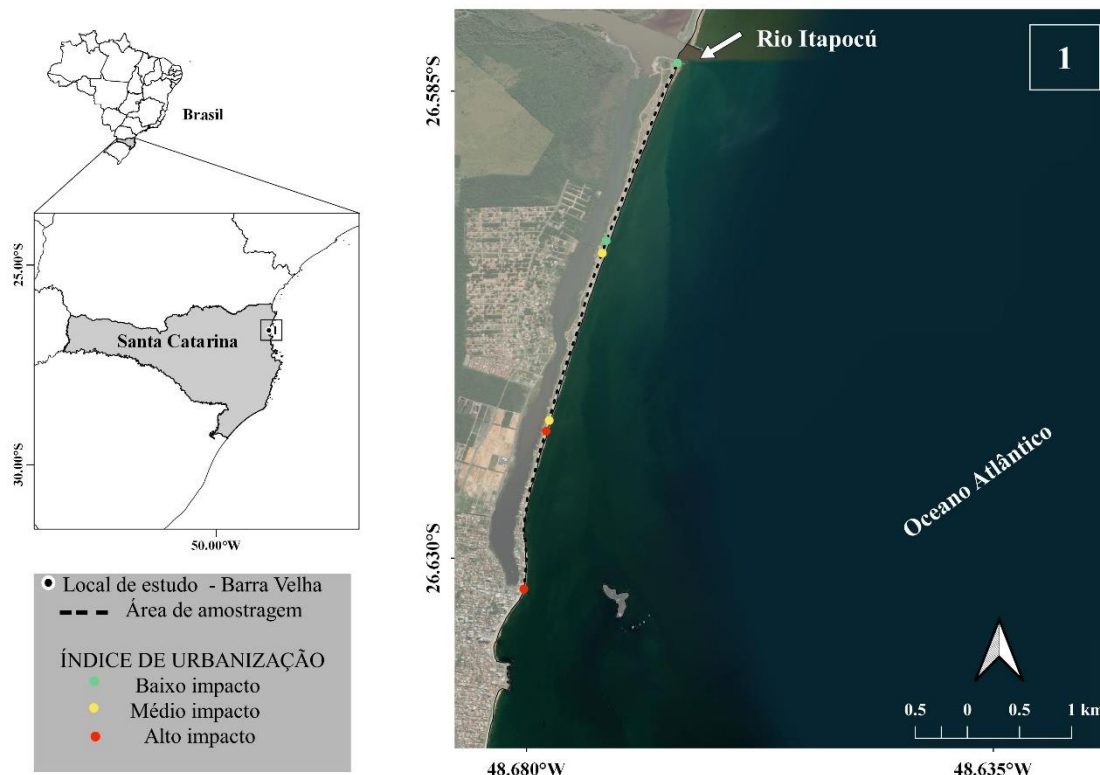


Fig. 1 – Mapa da área de estudo e locais de amostragem de espécimes de *Ocypode quadrata* em uma praia no sul do Brasil.

Assim, a praia foi categorizada em três níveis de urbanização (alto, médio e baixo) conforme o índice de urbanização (IU) proposto por González et al., 2014 :alto impacto ($IU > 0,6$), médio impacto ($0,6 > IU > 0,4$) e baixo impacto ($IU < 0,4$) (Tabela S1).

2.2. Amostragem de espécimes e biometria

A coleta foi autorizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) por meio do Sistema de Autorização e Informação sobre Biodiversidade (SISBIO) licença nº. 57786. Os espécimes do caranguejo *O. quadrata* foram capturados pelo método descrito por Pombo e Turra (2013) a coleta ocorreu manualmente e por escavação de tocas com sinal de atividade no período de março de 2017 a fevereiro de 2018 na praia da Lagoa de Barra Velha. A captura foi realizada mensalmente, nos períodos de atividade de forrageamento do caranguejo-fantasma (Apêndice A III-IV), que ocorrem durante o dia no outono e inverno (março a agosto) e à noite na primavera e verão (setembro a fevereiro) (do Vale et al., 2022), com duração de 2 horas em cada local de coleta. Entretanto, foram analisados apenas os meses em que amostras de plásticos foram detectadas (veja Análise de dados). Os animais foram transportados em caixa térmica com gelo para a eutanásia e para minimizar a digestão enzimática. No laboratório, foram obtidos os dados biométricos dos exemplares,

incluindo peso corporal úmido (biomassa) com auxílio de uma balança analítica. A largura da carapaça foi medida com paquímetro digital de precisão (0,01 mm) (Apêndice A-I e II) e em seguida, a carapaça dorsal foi removida e o estômago foi armazenado em etanol 70%.

2.3. *Análise Estomacal*

Antes de iniciar o procedimento, a bancada do laboratório e os equipamentos para análise estomacal eram higienizados com álcool 70% para prevenir qualquer tipo de contaminação. A presença ou ausência de material antrópico no conteúdo estomacal foi examinada em placas de Petri contendo álcool 70%, utilizando um estereomicroscópio (Zeiss Stemi DV4) com aumento de 100x. Os critérios para distinguir partículas orgânicas e areia de fragmentos de plásticos foram baseados nos padrões estabelecidos por Norén (2007): 1. Ausência de estruturas celulares ou orgânicas visíveis; 2. No caso de fibras, devem apresentar espessura consistente e forma tridimensional curva; 3. Apresentar cor clara e uniforme, como azul, vermelho, preto ou amarelo. Adicionalmente, foi realizada visualmente uma triagem e a identificação dos fragmentos plásticos, considera uma metodologia simples e acessível a especialistas e voluntários (Shim et al., 2017). Os plásticos identificados foram classificados de acordo com suas formas e cores (Costa et al., 2019a).

Juntamente com os fragmentos de plástico, os itens alimentares ingeridos que não puderam ser identificados devido à intensa trituração durante a manipulação anterior à digestão, assim como pela ação do sistema bucal e dos ossículos gástricos (Williams, 1981), foram agrupados como matéria orgânica não identificada (MONI). Os itens alimentares restantes foram classificados no menor nível taxonômico possível. Após a abertura do estômago, a plenitude estomacal foi categorizada em cinco níveis: 1 = estômago vazio, 2 = $\frac{1}{4}$ preenchido, 3 = metade preenchido, 4 = $\frac{3}{4}$ preenchido e 5 = cheio. A análise da dieta foi realizada pela frequência de ocorrência (FO) (Hyslop, 1980) e pelo volume de cada item alimentar (Vo) (Albrecht e Pellegrini-Caramaschi, 2003). Em seguida, foi aplicado o Índice Alimentar (IAi) (Kawakami e Vazzoler, 1980), calculado pela fórmula: $IAi = [(F_i \times V_i) / \sum (F_i \times V_i)] \times 100$, onde F é a frequência de ocorrência (%) do item e V é o volume (mm³) do item (ver apêndice C).

2.4. *Fator de condição*

Ao relacionar o peso corporal com a largura da carapaça, obtém-se o “bem-estar” ou a condição corporal do caranguejo. Esse parâmetro, conhecido como fator de condição

relativo (Le Cren, 1951), é uma ferramenta essencial para identificar mudanças na condição corporal causadas por ações antrópicas, variações biológicas e nutricionais (Gomiero e Braga, 2003; Hamid et al., 2018). O fator de condição foi calculado a partir das medidas individuais, usando a largura da carapaça (L_c) e peso úmido (P_o). A curva de ajuste da relação entre peso e largura foi definida pela equação $P = a \cdot L_c^b$ (Le Cren, 1951). Com os coeficientes “a” e “b” estimados, foram calculados os pesos teoricamente esperados (P_e) para as larguras respectivas (L_c). O fator de condição relativo (K_n) foi então determinado pela formula $K_n = P_o/P_e$.

2.5. *Análise de dados*

Os dados analisados incluíram amostras mensais de indivíduos com plástico no conteúdo estomacal, limitadas aos meses de março, abril, junho, julho, agosto, outubro e novembro. Os indivíduos foram então divididos em dois grupos: plástico presente e plástico ausente. Para avaliar a variação dos itens alimentares na dieta, entre os dois grupos, os valores dos índices de importância alimentar (IA_i) foram submetidos à análise de variância permutacional (PERMANOVA) usando a função *adonis* no pacote *vegan* R, com base nas dissimilaridades de Bray-Curtis (Anderson, 2001). A análise percentual de similaridade (SIMPER) foi utilizada para identificar quais categorias alimentares mais contribuíram para as diferenças entre os grupos (Clarke e Warwick, 1994).

Os dados de biomassa e do fator de condição relativo (K_n) foram previamente testados quanto à normalidade usando o teste Shapiro-Wilk e quanto à homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene (Zar, 2010). Devido à falta de distribuição normal dos dados de biomassa, estes foram transformados, utilizando logaritmo para reduzir a assimetria. Para detectar diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os grupos de indivíduos com plásticos e sem plásticos no estômago em relação à biomassa e ao fator de condição (K_n), foi realizada um teste t para amostras independentes (Zar, 2010). A correlação entre o volume de plásticos nos estômagos e a biomassa, assim como o K_n foi avaliada utilizando o coeficiente de correlação de Spearman (r) e o seu respectivo valor de p .

Para verificar se a presença de plásticos no conteúdo estomacal está relacionada à (1) distância do rio, (2) ao grau de impacto humano (índice de urbanização) e (3) à repleção estomacal, foi testada a multicolinearidade usando o fator de inflação da variância (VIF) (Zuur et al., 2010). Dada a ausência de multicolinearidade, um modelo linear generalizado (GLM) com distribuição binominal foi utilizado para quantificar a probabilidade da presença de plásticos em função desses três preditores. A seleção do

melhor modelo foi baseada no Critério de Informação de Akaike (AIC) (Burnham et al., 2011; Burnhan e Anderson, 2002). Todas as análises e gráficos foram gerados utilizando o software R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023).

3. Resultados

3.1. Conteúdo estomacal

Ao analisar o conteúdo estomacal dos indivíduos, foram identificados 20 itens alimentares (Tabela S2). Nos caranguejos sem plásticos, 17 itens alimentares foram encontrados, variando em frequência de ocorrência (%) e volume (mm³). Esses itens foram agrupados em sete categorias principais de alimentos (Areia, Material Vegetal, Matéria orgânica não identificada, Nematoda, Bilvavia, Insecta e Crustacea) e examinados individualmente. Para os estômagos dos caranguejos com plásticos, foi identificado 10 itens alimentares e agrupados em nove categorias de alimentos (Areia, Plástico, Material vegetal, Matéria orgânica não identificada, Annelida, Nematoda, Bilvavia, Insecta e Crustacea) (Tabela S2).

A coleta dos espécimes de *O. quadrata* na praia da Lagoa de Barra Velha, foi realizada ao longo de doze meses. Durante esse período, a presença de meso(micro)plásticos no conteúdo estomacal dos caranguejos foi detectada em sete meses: março, abril, junho, julho, agosto, outubro e novembro. No total, foram amostrados 58 indivíduos adultos, dos quais 15 (25,90%) apresentaram plásticos no conteúdo estomacal. Além disso, não houve diferenças significativas entre os sexos em relação à presença de plásticos (Qui-quadrado com correção de Yates, $\chi^2 = 1,58$; $p = 0,2$). O volume dos meso(micro)plásticos no conteúdo estomacal variou de 0,0001 a 10 mm³, com microfibras nas cores vermelha, azul e preta representando 60% dos microplásticos mais encontrados, seguidas por fragmentos de plástico mole, que constituíram 40% do mesoplástico (Fig. 2).

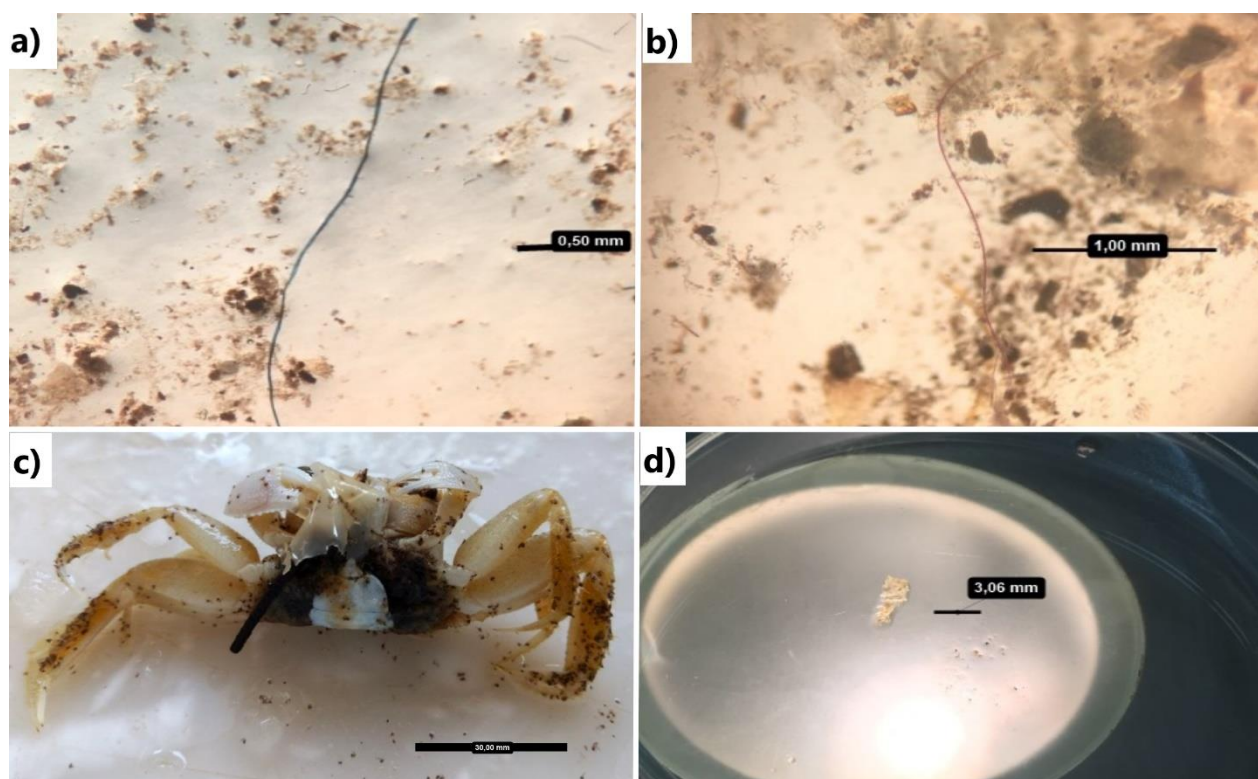


Fig. 2 – Exemplos de microplástico e mesoplástico no estômago de *O. quadrata*. Exemplos de microfibras encontradas (a) e (b) no estômago. Fragmento de plástico macio na região da boca (c) e o mesmo material digerido no estômago (d).

3.2. Índice de Alimentar (IAi) e Análise de porcentagem de similaridade (SIMPER)

A Figura 3 mostra as categorias alimentares e os respectivos valores de IAi mensalmente.

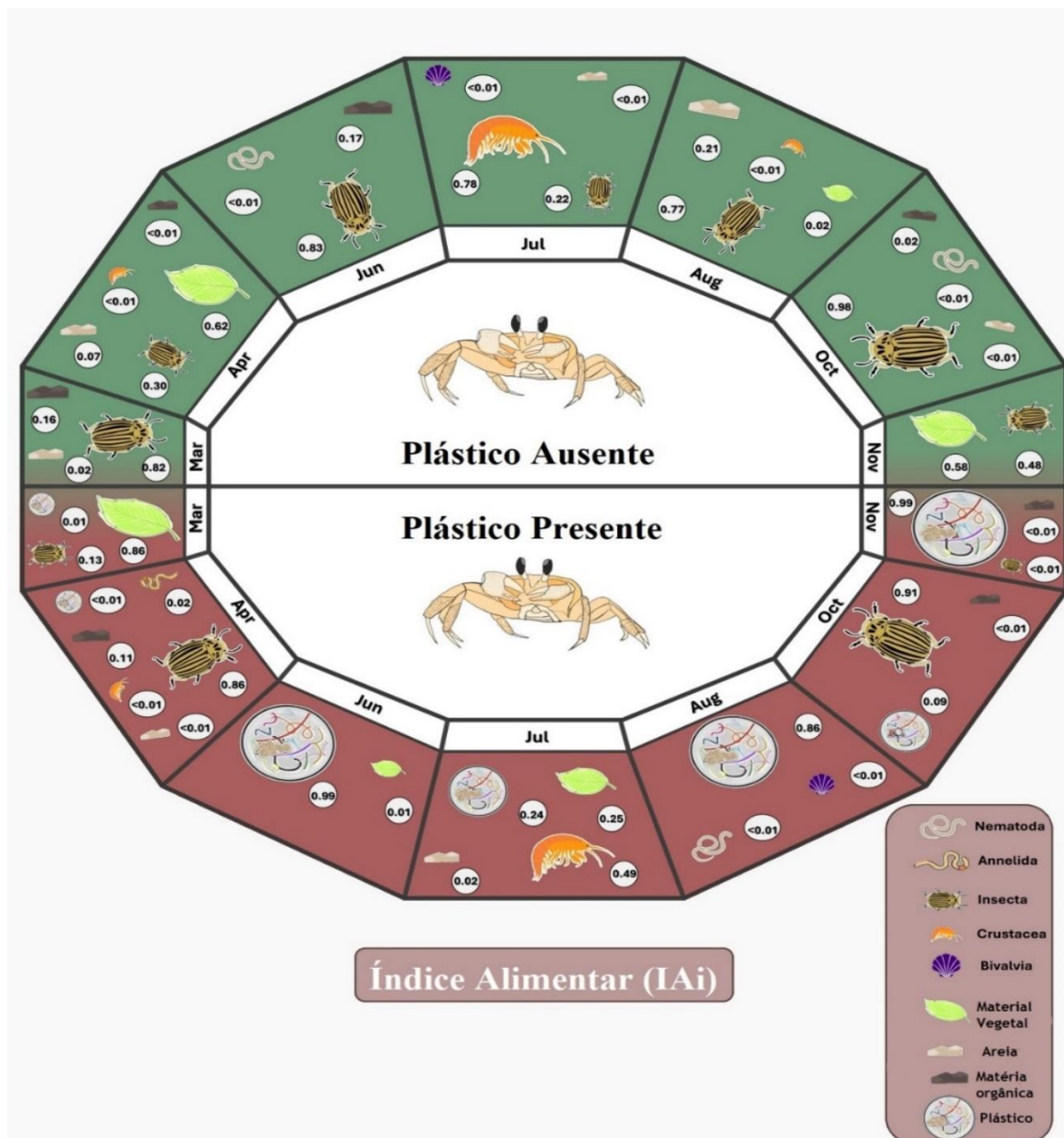


Fig. 3 – Índice Alimentar (IAi) para o grupo com plástico e sem plástico em cada mês.

Nos caranguejos sem plástico no conteúdo estomacal, a categoria Insecta predominou em março (0,82), junho (0,83), agosto (0,77) e outubro (0,98). O Material Vegetal foi mais representativo em abril (0,62) e novembro (0,58), e Crustacea em julho (0,78). Para os caranguejos com plástico no estômago, a categoria Plástico predominou em junho (0,99), agosto (0,86) e novembro (0,99). Em seguida, Insecta foi mais

representativa em abril (0,86) e outubro (0,91), enquanto Material Vegetal predominou em março (0,86). Observou-se que, nos meses de junho e agosto, quando a dieta dos caranguejos consistiu principalmente de insetos, a categoria Plástico foi o componente predominante entre os indivíduos que o ingeriram. O mesmo ocorreu em novembro, quando predominou material vegetal na dieta, mas, entre os que ingeriram plástico, este foi o componente principal. Ao submeter esses dados gerados pelo IAI à análise PERMANOVA, foram detectadas diferenças significativas na dieta entre os grupos sem plástico e com plástico ($p < 0,05$) (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultados da análise de variância de permutação (PERMANOVA) para *Ocypode quadrata* com base em matrizes de similaridade de Bray-Curtis. O fator analisado foi grupos (Grupo 1: Plástico ausente; Grupo 2: Plástico Presente). Códigos adicionais: Df, graus de liberdade; Sum of Sqs, soma dos quadrados; R², coeficiente de determinação; estatística F; e Pr(>F) significativo para $P < 0,05$

Source	Df	Sum of Sqs	R ²	F	Pr(>F)
Grupos	1	0.867	0.226	3.509	0.028*
Residual	12	2.965	0.773		
Total	13	3.832	1.000		

Complementarmente, a análise de Porcentagem de Similaridade (SIMPER) indicou que as categorias alimentares Insecta (33,62%), Plástico (30,10%) e Material Vegetal (17,73%), juntos contribuíram com 75,39% para as diferenças na dieta entre os grupos amostrados (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados da análise SIMPER para categorias de alimentos de *Ocypode quadrata* contribuindo para a dissimilaridade entre grupos.

Categoria Alimentar	Av. dissim	Contrib. %	Cumulative %	Média Plástico Ausente	Média Plástico Presente
Insecta	25.35	33.62	33.62	0.621	0.273
Plástico	22.69	30.10	63.73	0	0.454
Material Vegetal	13.14	17.43	81.15	0.174	0.161
Crustacea	8.041	10.67	91.82	0.111	0.0704
Matéria Orgânica	2.817	3.737	95.56	0.0505	0.0165
Areia	2.196	2.913	98.47	0.044	0.00221

**Continuação
Tabela 2**

Categoria Alimentar	Av. dissim	Contrib. %	Cumulative %	Média Plástico Ausente	Média Plástico Presente
Bivalvia	1.029	1.364	99.83	0.000272	0.0204
Annelida	0.1232	0.1634	100	0	0.00246
Nematoda	0.001779	0.002359	100	<0.01	<0.01

A categoria Insecta e Material vegetal predominou como recurso alimentar no grupo sem plástico e a categoria Plástico e Insecta teve maior representatividade na dieta do grupo com plástico no estômago.

3.3 Biomassa (g) e fator de condição relativo (Kn)

Os valores de biomassa dos caranguejos adultos *O. quadrata*, variaram de 7,78 a 45,96 g (média $\pm$ 22,65 DP: $\pm$ 12,05 g) para o grupo sem plástico estomacal e de 7,74 a 40,33 g ($23,87 \pm 11,46$ g) para o grupo com plástico no estômago. O teste t para as duas amostras independentes não encontrou diferenças significativas nos valores de biomassa entre grupos ($t(56) = -0,325$; $p = 0,75$) (Tabela S2). Os valores do fator de condição relativo (Kn) variaram de 0,84 a 1,52 ($1,07 \pm 0,12$) para o grupo sem plástico e de 0,92 a 1,41 ($1,10 \pm 0,12$) para o grupo com plástico. Para o fator de condição, também não houve diferenças significativas nos valores de Kn entre os grupos ($t(56) = -0,935$; $p = 0,35$).

3.3.1. Correlação do volume (mm^3) de plásticos com a Biomassa e o Fator de condição relativo (Kn)

Utilizando o coeficiente de Spearman, não foi identificada uma correlação significativa entre o volume de plásticos e a biomassa ($r = 0,095$; $p = 0,74$) (Fig. 4a).

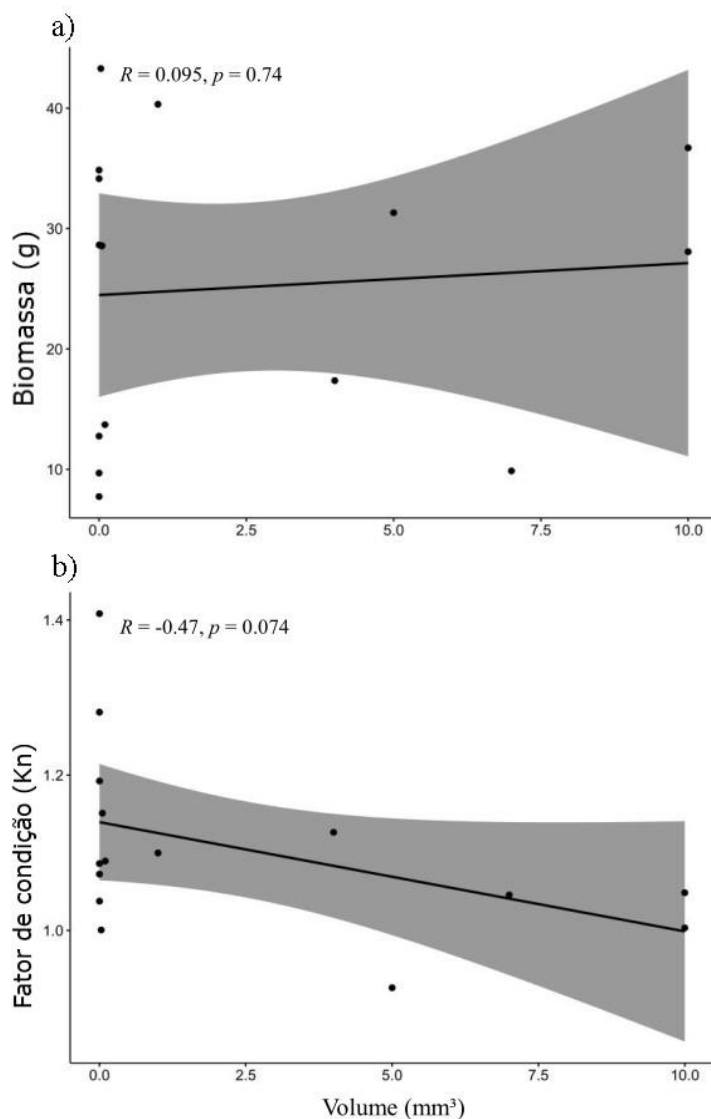


Fig. 4 – A correlação entre o volume de plásticos no estômago do caranguejo fantasma *Ocypode quadrata* e a biomassa (A) e o fator de condição relativo (B).

Por outro lado, a correlação entre o volume de plásticos e o fator de condição relativo (Kn) foi moderadamente negativa (Fig. 4b), indicando que à medida que aumenta o volume de plásticos a condição corporal diminui, embora sem diferenças significativas ($r = -0,47$; $p = 0,07$).

3.4. Ocorrência de fragmentos plásticos e MPs no estômago de *O. quadrata*

Os estômagos dos caranguejos-fantasma que continham fragmentos plásticos e MPs sempre apresentavam algum item alimentar. Esses caranguejos com plástico no estômago foram encontrados em toda extensão da praia da Lagoa de Barra Velha (Fig. 1). De acordo com os valores de AIC, o modelo linear generalizado (GLM) binomial indicou

que os preditores distância do rio, índice de urbanização e presença de alimento no conteúdo estomacal não estavam relacionados com a presença de plástico na dieta do caranguejo *O. quadrata* (Tabela S3).

4. Discussão

Este estudo é o primeiro a reconhecer a biotransformação do plástico pelo *O. quadrata*, que tritura mesoplásticos pela ação mecânica dos dácilios e do estômago (Fig.2). Relatos de comportamentos semelhantes foram observados no anfípode de água doce (Mateos-Cárdenas 2020) e no caranguejo estuarino *Carcinus maenas* (Watts et al., 2015), os quais os plásticos são excretados em tamanhos menores e liberadas no ambiente. Isso levanta a questão de que o caranguejo-fantasma pode, de fato, desempenhar um papel na liberação de microplásticos no sedimento de praias arenosas. Além disso, demonstrou, pela primeira vez em condições naturais de uma praia arenosa subtropical, que a preferência alimentar do caranguejo-fantasma *O. quadrata* é modificada pela ingestão de meso(micro)plásticos.

Os resultados sugerem que o caranguejo-fantasma *O. quadrata*, considerado uma espécie-chave, pode ter seu papel ecológico comprometido (e.g, bioturbação e a ciclagem de nutrientes), o que impactaria a teia alimentar na interface mar-terra (Schlacher et al., 2013; Lucrezi et al., 2014). O plástico contribuiu significativamente para a dieta do caranguejo-fantasma, tornando-se a principal categoria alimentar nos meses de maior consumo de insetos e material vegetal. Essa alteração alimentar sugere potenciais efeitos deletérios, como a bioacumulação e a biomagnificação de plásticos e contaminantes associados (Miller et al., 2020). Os dados confirmam a primeira hipótese, ao demonstrar que o consumo de plástico reduziu a ingestão de outros alimentos. No entanto, a quantidade de plástico ingerida não foi suficiente para reduzir a biomassa e a condição corporal dos caranguejos estudados, refutando a segunda hipótese. Além disso, não houve relação entre a presença de plástico na dieta e fatores como a distância da foz do rio, urbanização da praia e a presença de alimento no conteúdo estomacal.

As adaptações morfológicas, fisiológicas e comportamentais do caranguejo-fantasma permitem sua ampla distribuição em praias arenosas (Lucrezi et al., 2014), facilitando o acesso a diversos recursos alimentares. Os achados revelaram que a dieta de *O. quadrata* inclui uma variedade de itens ingeridos, como insetos, material vegetal e crustáceos, além de plásticos, com predomínio de microfibras. A ingestão de plásticos pode ocorrer de forma acidental, junto com alimentos naturais, ou intencionalmente,

quando o plástico é confundido com alimento (Moser and Lee, 1992; Caparelli et al., 2022). Essa confusão pode enganar os sentidos dos animais, levando-os a ingerir materiais nocivos em vez de nutritivos, devido à semelhança visual e, sobretudo, ao odor dos plásticos bioincrustantes, que atuam como armadilhas olfativas (Greenshields et al., 2021).

A interferência nos sentidos é preocupante, pois evidencia a facilidade como os plásticos podem ser confundidos com alimento e incorporados à cadeia alimentar marinha-terrestre, o que resulta na transferência trófica, ou seja, a ingestão de presas contaminadas (Athey et al., 2020). Nos conteúdos estomacais analisados, foi identificado itens alimentares comuns na dieta do caranguejo que são conhecidos por interagir e ingerir MPs, como crustáceos (Iannilli et al., 2018; Carrasco et al., 2019), insetos (Romiti et al., 2021; Costa et al., 2023), bivalves (Jankauskas et al., 2024) e anelídeos (Gusmão et al., 2016). Análises dessas presas do caranguejo *O. quadrata* poderiam confirmar a ocorrência de contaminação por transferência trófica. Todavia, nossos resultados já indicam um risco potencial de contaminação, uma vez que a presença de plásticos e contaminantes associados (e.g., metais pesados, pesticidas, ftalados) nas presas pode prejudicar o caranguejo por meio de transferência trófica.

Por meio do índice alimentar (IAi) foram verificadas diferenças significativas, na dieta do caranguejo *O. quadrata* ao ingerir meso(micro)plásticos, principalmente pela redução do consumo de insetos. Pesquisas mostram que a ingestão de plásticos pode ser prejudicial ao trato digestivo e influenciar o comportamento alimentar do organismo, levando à pseudosaciedade e consequentemente a redução na ingestão de alimentos (Cole et al., 2013; Wellden and Cowie, 2016). Os resultados no presente trabalho, confirmam essa influência pela composição alimentar, pois os indivíduos com meso(micro)plásticos nos estômagos tinham menos itens alimentares. Esses achados corroboram experimentos que demonstraram uma redução no consumo de alimentos pelos caranguejos à medida que as concentrações de MPs aumentam (Pichardo-Casales et al., 2024; Urbina et al., 2023).

Assim, a diminuição na ingestão de alimentos pode, em princípio, afetar o crescimento do organismo, uma vez que o plástico não fornece valor energético que contribua para o desenvolvimento (Welden and Cowie, 2016). No entanto, os resultados do presente estudo não indicaram diminuição significativa no crescimento dos caranguejos, conforme medido pela biomassa e condição corporal. Isto pode ser atribuído, à baixa ocorrência e ao pequeno volume de meso(micro)plásticos encontrados no

conteúdo estomacal, pois o tamanho das partículas de plásticos influencia o impacto nos organismos (Bucci et al., 2020). A baixa detecção de meso(micro)plásticos no conteúdo estomacal no presente trabalho podem ser explicada pela alta taxa metabólica dos caranguejos e pela capacidade de excreção desses fragmentos pelas fezes e/ou durante o processo de muda (Costa et al., 2023; Pichardo-Casales et al., 2024). Além disso, o crescimento não diminuiu possivelmente porque não ocorreu a falsa saciedade, especialmente no caso do caranguejo *O. quadrata*, que requer um tempo considerável para que esse efeito se manifeste, pois a espécie é bem adaptada para enfrentar períodos prolongados de privação nutricional (Vinagre e Chung, 2016). Portanto, é necessário investigar a capacidade de retenção e o tempo de permanência do plástico no estômago do caranguejo-fantasma para entender em que momento o crescimento e outras funções fisiológicas podem ser negativamente afetados.

A incidência de plásticos na dieta do caranguejo-fantasma ocorreu exclusivamente em indivíduos adultos, conhecidos por sua maior interação com detritos marinhos devido as adaptações comportamentais (Costa et al., 2019a). Especialmente em épocas mais frias, a menor disponibilidade de alimentos naturais pode aumentar a interação e ingestão de detritos marinhos, incluindo plásticos, como uma possível estratégia para suprir as necessidades alimentares (do Vale et al., 2022). Além disso, a presença de alimentos naturais pode reduzir a ingestão de microplásticos (Prata et al., 2023). Outro fator que influencia a presença de plástico na dieta de um organismo é a distribuição e a biodisponibilidade de microplásticos, que são afetadas diretamente por descargas fluviais e pelo nível de urbanização (Tian et al., 2023; Perumal e Muthuramalingam, 2022). Esses aspectos podem influenciar a quantidade de plásticos disponíveis para ingestão pelos caranguejos.

Assim, foi testado modelos para avaliar a relação entre a presença de plástico no estômago dos caranguejos e fatores como a distância da foz do rio, o grau de urbanização e a repleção estomacal. No entanto, os resultados não revelaram uma relação significativa entre esses preditores e a presença de plástico nos estômagos de *O. quadrata*. Em contraste, para bivalves, a distância dos rios e grau de urbanização são bons preditores de contaminação por microplásticos (Jankauskas et al., 2024). Por outro lado, o efeito do grau de urbanização sobre a incidência de plásticos em *O. quadrata* não é claro, mas a presença de alimentos demonstrou uma relação positiva com a presença de MPs segundo Costa et al. (2019b). Nos achados do presente estudo, embora não tenha sido detectada

uma relação com a repleção estomacal, todos os indivíduos com plástico apresentaram algum item alimentar.

A metodologia utilizada para analisar a dieta e identificar meso e microplásticos no conteúdo estomacal do caranguejo *O. quadrata* foi fundamental para confirmar a contaminação por via oral. Contudo, a contaminação também pode ocorrer por meio da respiração branquial. Foi documentada a presença de microplásticos em outras partes de caranguejos, como brânquias e musculatura (Villagran et al., 2020; Caparrelli et al., 2022) e em outros invertebrados, como hepatopâncreas e gônadas (Sfriso et al., 2024). Dessa forma, novos estudos que identifiquem o plástico em todo o corpo do caranguejo-fantasma são essenciais para melhor compreensão de onde os microplásticos estão sendo incorporados no corpo nesse animal.

O presente estudo revelou que a plasticidade trófica do caranguejo-fantasma dificulta a identificação das fontes do material plástico e seus impactos na dieta e no crescimento do organismo. A entrada de meso e microplásticos em praias arenosas, provenientes de fontes terrestres, oceânicas, fluviais, bem como transportados pelo vento, levanta questionamentos sobre quais dessas fontes exercem maior influência sobre os organismos. Pesquisas sobre a ecologia trófica da macrofauna são essenciais para entender como esses plásticos se integram e se propagam na cadeia alimentar. A ingestão de plásticos por predadores de topo, como aves que consomem o caranguejo-fantasma (Rocha et al., 2021), e por presas do caranguejo (Costa et al., 2023), ressalta a urgência de ampliar estudos que investiguem a contaminação por plástico na teia alimentar costeira. Mudanças subletais em populações, como a alteração na dieta, podem ser bons indicadores de distúrbios em ambientes de transição (Costa e Zalmon, 2017). No entanto, o comportamento alimentar de *O. quadrata* não se mostrou um bom indicador ao analisar áreas com gradiente de urbanização (Arueira et al., 2022). O índice de urbanização considera múltiplos estressores de urbanização (e.g., proximidade de centros urbanos, infraestrutura de praia, tráfego de veículos, visitantes, limpeza de praias e detritos), mas o uso de um estressor específico pode fornecer uma resposta mais sensível, que pode facilitar a identificação de alterações subletais na população (Barboza et al., 2021; do Vale et al., 2024).

Os resultados indicaram que o plástico, um estressor específico, influenciou a preferência alimentar de *O. quadrata*, o que pode tornar essa alteração alimentar um indicador promissor e um alerta precoce de impactos humanos em praias. Diante dessas

observações, é fundamental implementar medidas de políticas públicas eficazes para a gestão de detritos sólidos, uma vez que a crescente presença de plásticos em ambientes costeiros pode ter impactos diretos na fauna local. A educação ambiental pode desempenhar um papel fundamental na conscientização de banhistas, turistas e moradores promovendo ações coletivas que visem a redução do uso de plásticos e a proteção dos ecossistemas costeiros.

5. Conclusão

A ingestão de MPs e fragmentos de plástico mole por *O. quadrata* alterou significativamente a composição alimentar, com destaque para a redução no consumo de insetos. O plástico tornou-se o principal item da dieta nos meses de maior consumo de insetos e material vegetal. Essa diminuição no consumo de alimentos naturais sugere uma interferência nas relações tróficas nas praias arenosas, afetando a dinâmica entre as teias alimentares marinhas e terrestres. Embora a ingestão de plásticos possa causar uma falsa saciedade, isso não foi suficiente para reduzir a biomassa e a condição corporal dos caranguejos, e não apresentou relação com a distância do rio, o grau de urbanização ou repleção estomacal. Apesar de *O. quadrata* ser considerado um bioindicador de impactos antropogênicos em praias arenosas, são necessários mais estudos para consolidá-lo como espécie sentinela na avaliação de meso e microplásticos. No entanto, a alteração na dieta causada pelo consumo de plástico reforça o potencial desse material como um alerta precoce de mudanças ambientais. O desequilíbrio ecológico provocado pela entrada plástico na cadeia trófica pode resultar em perdas severas a longo prazo, o que constitui uma séria ameaça à fauna e ao ecossistema costeiro.

Referências

- Albrecht, M.P., Pellegrini-Caramaschi, E., 2003. Feeding ecology of *Leporinus taeniofasciatus* (Characiformes: Anostomidae) before and after installation of a hydroelectric plant in the upper rio Tocantins, Brazil. *Neotrop. Ichthyol.* 1, 53–60. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252003000100006>.
- Anderson, M. J., 2001. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecol.* 26, 32–46. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>.
- Andrady, A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1596–1605.

- Auta, H.S., Emenike, C.U., Fauziah, S.H., 2017. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environ. Int.* 102, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
- Athey, S. N., Albotra, S. D., Gordon, C. A., Monteleone, B., Seaton, P., Andrady, A. L., ... & Brander, S. M. (2020). Trophic transfer of microplastics in an estuarine food chain and the effects of a sorbed legacy pollutant. *Limnology and Oceanography Letters*, 5(1), 154-162.
- Barboza, C.A.M., Mattos, G., Soares-Gomes, A., Zalmon, I.R., Costa, L.L., 2021. Low densities of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* related to large scale human modification of sandy shores. *Front. Mar. Sci.* 8, 103. doi: 10.3389/fmars.2021.589542.
- Blaber, S.J.M., 2000. Tropical Estuarine Fishes: Ecology, Exploitation and Conservation. Blackwell, Oxford (372 pp.).
- Burnham KP, Anderson DR (2002) Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2nd edn. Springer, New York
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., & Huyvaert, K. P. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral ecology and sociobiology*, 65, 23-35.
- Carr, S.A.; Liu, J. & Tesoro, A.G. 2016. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91: 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>.
- Carrasco, A., Pulgar, J., Quintanilla-Ahumada, D., Perez-Venegas, D., Quijón, P. A., & Duarte, C. 2019. The influence of microplastics pollution on the feeding behavior of a prominent sandy beach amphipod, *Orchestoidea tuberculata* (Nicolet, 1849). *Marine pollution bulletin*, 145, 23-27.
- Capparelli, M. V., Gómez-Ponce, M. A., Borges-Ramírez, M. M., Rendón-von Osten, J., Celis-Hernández, O., Briceño-Vera, A. E., ... & Moulatlet, G. M. (2022). Ecological traits influence the bioaccumulation of microplastics in commercially important estuarine crabs from the southeastern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114088.
- Clarke, K.R., Warwick, R.M., 1994. An approach to statistical analysis and interpretation. *Change in marine communities* 2, 117–143.
- Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway TS (2013) Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental science & technology* 47: 6646–6655. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es400663f>
- Corcoran, P.L., Biesinger, M.C., Grifi, M., 2009. Plastics and beaches: a degrading relationship. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.08.022>.
- Corradini, F.; Meza, P.; Eguiluz, R.; Casado, F.; Huerta-Lwanga, E. & Geissen, V. 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671: 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>.

- Costa, L. L., Arueira, V. F., da Costa, M. F., Di Benedetto, A. P. M., & Zalmon, I. R. 2019a. Can the Atlantic ghost crab be a potential biomonitor of microplastic pollution of sandy beaches sediment?. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 5-13.
- Costa, L. L., Madureira, J. F., Di Benedetto, A. P. M., Zalmon, I. R. 2019b. Interaction of the Atlantic ghost crab with marine debris: Evidence from an in situ experimental approach. *Marine pollution bulletin*, 140, 603-609.
- Costa, L. L., da Costa, I. D., da Silva Oliveira, A., & Zalmon, I. R. 2023. "Microplastic ecology": Testing the influence of ecological traits and urbanization in microplastic ingestion by sandy beach fauna. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 290, 108406.
- Dantas, D.V., Barletta, M., Costa, M.F., 2015. Feeding ecology and seasonal diet overlap between *Stellifer brasiliensis* and *Stellifer stellifer* in a tropical estuarine ecocline. *J. Fish Biol.* 86, 707–733.
- de Barros, M. S. F., & dos Santos Calado, T. C. 2020. Plastic ingestion lead to reduced body condition and modified diet patterns in the rocky shore crab *Pachygrapsus transversus* (Gibbes, 1850)(Brachyura: Grapsidae). *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111249.
- do Vale, J.G., Barrilli, G.H. C., Chahad-Ehlers, S., Branco, J.O., 2022. Factors Influencing the Feeding Habits of the Ghost Crab *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) on Subtropical Sandy Beaches. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 269, 107817. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107817>.
- García-Regalado, A., Herrera, A., Almeda, R. 2024. Microplastic and mesoplastic pollution in surface waters and beaches of the Canary Islands: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 201, 116230.
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Flórez, P., 2018. Beach litter and woody debris colonizers on the Atlántico Department Caribbean coastline, Colombia. *Mar. Pollut. Bull.* 128, 185–196.
- Greenshields, J., Schirrmacher, P., & Hardege, J. D. (2021). Plastic additive oleamide elicits hyperactivity in hermit crabs. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112533.
- Gomes, T.T., Gheler-Costa, C., Rinaldi, C.A., Santana, W., 2019. Natural diet of *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787) (Crustacea, Decapoda, Brachyura) from the northern coast of São Paulo, Brazil. *Pap. Avulsos Zool* 59, e20195957. <https://doi.org/10.11606/1807-0205/2019.59.57>.
- Gomiero, L.M., Braga, F.M.S., 2003. Relação peso-comprimento e fator de condição para *Cichla cf. ocellaris* e *Cichlamonoculus* (Perciformes, Cichlidae) no reservatório de Volta Grande, rio Grande-MG/SP. *Acta Sci* 25(1):79–86
- González, S.A., Yáñez-navea, K., Muñoz, M., 2014. Effect of coastal urbanization on sandy beach coleoptera *Phaleria maculata* (Kulzer, 1959) in northern Chile. *Mar. Pollut. Bull.* 83, 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.042>.
- Gül, M. R., Griffen, B. D., 2019. Combined impacts of natural and anthropogenic disturbances on the bioindicator *Ocypode quadrata* (Fabricius, 1787). *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 519, 151185. doi: 10.1016/j.jembe.2019.151185

- Gusmão, F., Di Domenico, M., Amaral, A. C. Z., Martínez, A., Gonzalez, B. C., Worsaae, K., ... & da Cunha Lana, P. (2016). In situ ingestion of microfibrils by meiofauna from sandy beaches. *Environmental Pollution*, 216, 584-590.
- Haarr, M.L., Falk-Andersson, J., Fabres, J., 2022. Global marine litter research 2015–2020: geographical and methodological trends. *Sci. Total Environ.* 820, 153162 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153162>.
- Hamid, A., A. Hamid & A. Hamid, 2018. Carapace widthweight relationships and condition factor of blue swimming crab, *Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758 (Crustacea: Decapoda) in Lasongko Bay, Southeast Sulawesi, Indonesia. *Advances in Environmental Biology* 12: 14–21.
- Hyslop, E.J., 1980. Stomach contents analysis-a review of methods and their application. *J. Fish. Biol.* 17, 411–429. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1980.tb02775.x>.
- Iannilli, V., Di Gennaro, A., Lecce, F., Sighicelli, M., Falconieri, M., Pietrelli, L., ... & Battisti, C. 2018. Microplastics in *Talitrus saltator* (Crustacea, Amphipoda): new evidence of ingestion from natural contexts. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28725-28729.
- Jankauskas, L., Pinho, G. L. L., Sanz-Lazaro, C., Casado-Coy, N., Rangel, D. F., Ribeiro, V. V., & Castro, Í. B. 2024. Microplastic in clams: An extensive spatial assessment in south Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 201, 116203.
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768e771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
- Jones, D.A. 1972. Aspects of the ecology and behaviour of *Ocypode ceratophthalmus* (Pallas) and *O. kuhlii* de Haan (Crustacea: Ocypodidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 8, 31–43.
- Kawakami, E., Vazzoler, G., 1980. Método gráfico e estimativa de índice alimentar aplicado no estudo de alimentação de peixes. *Bol. Inst. Oceanogr.* 29, 205–207. <https://doi.org/10.1590/S0373-55241980000200043>.
- Le Cren, E. D., 1951. The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *J. Anim. Ecol.* 20 (2), 201–219. <https://doi.org/10.2307/1540>.
- Lucrezi, S., Schlacher, T. A., 2014. The ecology of ghost crabs- a review. *Oceanogr. Mar. Biol.* 52, 201–256.
- McLachlan A., Dorvlo, A. 2005. Global patterns in sandy beach macrobenthic communities. *J Coast Res* 21:674–687
- McGregor, S., Strydom, N. A. 2020. Feeding ecology and microplastic ingestion in *Chelon richardsonii* (Mugilidae) associated with surf diatom *Anaulus australis* accumulations in a warm temperate South African surf zone. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111430.
- Miller, M.E., Hamann, M., Kroon, F.J. 2020. Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms: A review and meta-analysis of current data. *PLOS ONE* 15(10): e0240792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240792>

- Moser, M.L., Lee, D.S., 1992. A fourteen-year survey of plastic ingestion by western North Atlantic seabirds. *Colon. Waterbirds* 15, 83–94. <https://doi.org/10.2307/1521357>
- Multisanti, C.R., Merola, C., Perugini, M., Aliko, V., Faggio, C., 2022. Sentinel species selection for monitoring microplastic pollution: a review on one health approach. *Ecol. Indic.* 145 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109587>.
- Norén, F., 2007. Small Plastic Particles in Coastal Swedish Waters. KIMO Sweden, KIMO Sweden Göteborg, Sweden
- Perumal, K., Muthuramalingam, S., 2022. Global sources, abundance, size, and distribution of microplastics in marine sediments - a critical review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 264, 107702 <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107702>.
- Pichardo-Casales, B., Vargas-Abúndez, J. A., Moulatlet, G. M., & Capparelli, M. V. 2024. Feces and molting as microplastic sinks in a mangrove crab. *Marine Pollution Bulletin*, 116410.
- Pombo, M., Turra. A. 2013. Issues to Be Considered in Counting Burrows as a Measure of Atlantic Ghost Crab Populations, an Important Bioindicator of Sandy Beaches. *PLOS ONE* 8(12): e83792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083792>
- R Core Team, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rae, C., Hyndes, G.A., Schlacher, T.A., 2019. Trophic ecology of ghost crabs with diverse tastes: Unwilling vegetarians. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 224, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.02.023>.
- Romiti, F., Pietrangeli, E., Battisti, C. *et al.* Quantifying the entrapment effect of anthropogenic beach litter on sand-dwelling beetles according to the EU Marine Strategy Framework Directive. *J Insect Conserv* 25, 441–452 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10841-021-00312-z>
- Schlacher, T. A., Strydom, S., & Connolly, R. M. 2013. Multiple scavengers respond rapidly to pulsed carrion resources at the land–ocean interface. *Acta Oecologica*, 48, 7–12.
- Shim, W.J., Hong, S.H., Eo, S., 2017. Identification methods in microplastic analysis: a review received. *Anal. Methods* 9, 1384–1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>.
- Shore, E. A., DeMayo, J. A., & Pespeni, M. H. 2021. Microplastics reduce net population growth and fecal pellet sinking rates for the marine copepod, *Acartia tonsa*. *Environmental Pollution*, 284, 117379.
- Tewfik, A., Bell, S.S., McCann, K.S., Morrow, K., 2016. Predator diet and trophic position modified with altered habitat morphology. *PLoS One* 11, e0147759. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147759>.
- Tian, W., Song, P., Zhang, H., Duan, X., Wei, Y., Wang, H., Wang, S., 2023. Microplastic materials in the environment: problem and strategical solutions. *Prog. Mater. Sci.* 132, 101035 <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101035>.

- Truchet, D. M., Lopez, A. F., Arduoso, M. G., Rimondino, G. N., Buzzi, N. S., Malanca, F. E., ... & Severini, M. F. 2021. Microplastics in bivalves, water and sediments from a touristic sandy beach of Argentina. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 113023.
- Urbina, M. A., da Silva Montes, C., Schäfer, A., Castillo, N., Urzúa, Á., & Lagos, M. E. 2023. Slow and steady hurts the crab: Effects of chronic and acute microplastic exposures on a filter feeder crab. *Science of the Total Environment*, 857, 159135.
- Welden NAC, Cowie PR (2016) Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, *Nephrops norvegicus*. *Environ Pollut* 218:895–900. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.020>
- Williams, M.J., 1981. Methods for analysis of natural diet in portunid crabs (Crustacea: Decapoda: Portunidae). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 52 (1), 103–113.
- Wolcott, T.G., 1978. Ecological role of ghost crabs, *Ocypode quadrata* (Fabricius) on an ocean beach: scavengers or predators? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 31, 67–82. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(78\)90137-5](https://doi.org/10.1016/0022-0981(78)90137-5).
- Zar, J.H., 2010. Biostatistical Analysis, fifth ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 944p.
- Zhang, K., Hamidian, A.H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J.K.H., Wu, C., Lam, P.K.S., 2021. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: a review. *Environ. Pollut.* 274, 116554. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Elphick, C.S., 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods Ecol. Evol.* 1, 3–14. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>.

Material Suplementar

Tabela S1 – O índice de urbanização da praia da Lagoa da Barra Velha, localizada no sul do Brasil, foi avaliado utilizando os critérios de González et al. (2014). Cada indicador foi pontuado em uma escala de 0 a 5. O cálculo do índice segue o método de Gover, utilizando a fórmula: $X = \sum ((X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}))$, onde X representa a pontuação para cada categoria, e $X_{\min}$ e $X_{\max}$ correspondem aos valores mínimo e máximo da escala, variando de 0 a 5

Indicador	Área 1	Área 2	Área 3
	Impacto baixo	Impacto médio	Impacto alto
Proximidade ao centro urbano	1	3	5
Construção na areia	0	2	5
Limpeza de praia	0	0	1
Resíduos sólidos na areia	1	3	4
Tráfego de veículos na areia	1	2	3
Frequência de visitantes	1	2	4
Índice de urbanização	0.13	0.36	0.72

Tabela S2 – Frequência de ocorrência (FO) e volume (Vo) de itens alimentares encontrados em estômagos de *Ocypode quadrata* capturados na praia da Lagoa da Barra Velha, sul do Brasil. Os meses são expressos como Mar-Março, Abr-Abril, Jun-Junho, Jul-Julho, Ago-Agosto, Out-Outubro, Nov-Novembro. Legenda: UOM = matéria orgânica não identificada, UPM = material vegetal não identificado, N.I = não identificado. Valores mais representativos estão em negrito

	SEM PLÁSTICO														COM PLÁSTICO													
	Mar		Apr		Jun		Jul		Aug		Oct		Nov		Mar		Apr		Jun		Jul		Aug		Oct		Nov	
	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o	FO	V _o
AREIA	1	0.76	0.35	3.42			0.75	0.5	0.33	13.5	0.25	0.04					0.2	<0.01			0.5	0.06						
PLÁSTICO																												
Microfibras														1	<0.01	0.8	<0.01			0.5	<0.01							
Fragmento de plástico mole																0.2	0.05	1	4	0.5	1	1	20.03	1	5	1	7.1	
MATERIAL																												
VEGETAL																												
UPM			0.06	0.02					0.16	2			0.5	112.5	1	13					0.5	1						
Tronco			0.12	90.20															1	0.06								
Esporo			0.06	<0.01																								
Semente			0.06	0.02																								
UOM	0.33	20	0.29	0.41	0.4	10					0.25	5					0.6	0.26								0.5	0.05	
Annelida																	0.2	0.12										
Nematoda					0.2	0.01					0.25	0.02											0.3	0.01				
Bivalvia							0.25	0.3														0.3	10					
INSECTA																												
Insecta N. I	0.3	0.04	0.26	12.82			0.25	4					0.75	54.01	1	2										0.5	0.1	
Apis spp.							0.25	30									0.8	1.5										
Formicidae					0.2	50							0.25	0.5														
Hemiptera			0.12	18																								
Coleoptera	0.33	100			0.2	50					0.25	100												1	50			
Scarabaeidae											0.25	200																
Thysanoptera							0.166	100																				
CRUSTACEA																												
Ovos e larvas de caranguejo			0.06	0.05													0.2	0.01										
Amphipoda (Talitridae)							0.5	61	0.33	0.06										1	1							

Tabela S3 – Modelo linear generalizado (GLM) com distribuição binomial testando preditores de distância do rio, índice de urbanização e presença de alimentos no conteúdo estomacal para a presença ou ausência de material plástico em *Ocypode quadrata*. O melhor modelo foi determinado com base nas categorias do Critério de Informação de Akaike (AIC)

A) Modelo global e Melhor modelo AIC = 72.25	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
Intercepto	-1,249449	1,048703	-1,191	0.233
Distância do rio	-0,007884	0,550300	-0,014	0.989
Nível de urbanização	0,358511	2,913787	0,123	0.902
Item alimentar (+)	0,063357	0,898973	0,070	0.944
B) Model AIC = 74.24				
Intercepto	-1,24839	1,04639	-1,193	0.233
Item alimentar (+)	0,06067	0,87920	0,069	0.945
Nível de urbanização (+)	0,32180	1,38832	0,232	0.817

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese teve o objetivo principal fornecer informações sobre a biologia do caranguejo *Ocypode quadrata* e avaliar as abordagens do uso como bioindicador em praias arenosas. Embora esse caranguejo seja amplamente considerado um dos principais bioindicadores dessas áreas, ainda existem lacunas no conhecimento sobre a biologia populacional, o que gera uma certa contradição. Isso ocorre porque a maior parte dos estudos sobre a espécie se baseia em métodos de amostragem indireta, como a contagem de tocas e a medição do diâmetro de suas aberturas. Apesar dessa abordagem ser não invasiva, de baixo custo e relativamente simples, ela não fornece informações sobre as características intrínsecas e extrínsecas do animal, como dados fisiológicos, reprodutivos e alimentares. Diante disso, o presente estudo combinou amostragens diretas (captura de espécimes) e indiretas (contagem de tocas e medidas do diâmetro), com o intuito de ampliar o conhecimento sobre a espécie e demonstrar as vantagens e desvantagens de cada tipo de medida, tanto das tocas quanto dos próprios caranguejos.

O desafio da amostragem de dados, seja de forma direta ou indireta, foi a limitação de estudos sobre o comportamento do caranguejo-fantasma (Palmer, 1971; Milne e Milne 1946; Pombo et al., 2018). O período de atividade do caranguejo é o que determina a metodologia do estudo. Portanto, a maioria das pesquisas ocorre durante o crepúsculo e a fase noturna. Contudo, na área geográfica onde o presente estudo foi conduzido, a atividade de *O. quadrata* ocorre à noite durante o verão e primavera, e durante o dia no outono e inverno (do Vale et al., 2022), e assim foram seguidos esse padrão para a realização das coletas. Esse dado evidencia que o horário de campo é um fator influenciador e limitador de informações. Estudos focados na ecologia comportamental são fundamentais para melhorar a compreensão sobre o período de atividade do animal.

Diante desse contexto, ao considerar o conjunto de dados obtidos ao longo das 36 coletas realizadas (12 em cada praia: Barra Velha, Navegantes e Itajáí), foram elaborados modelos para os parâmetros de densidade de tocas, diâmetro de tocas, biomassa e largura da carapaça. As variáveis ambientais, como temperatura e intensidade do vento, demonstraram um efeito significativo para os dados diretos e indiretos. Assim, dependendo das condições climáticas, a amostragem pode apresentar vieses. Além disso, o registro dessas variáveis são fundamentais para entender como o

animal se comporta em resposta a elas, contribuindo para que futuros estudos tenham um maior cuidado em relação a essas influências. Outra variável importante foram as características geomorfológicas da praia: o tamanho do grão de areia e a inclinação, que também tiveram efeitos significativos para os dados coletados das tocas. Isso resalta que o tipo de praia modula a história de vida e seleciona indivíduos.

Os fatores temporal e espacial são igualmente relevantes ao estudar o caranguejo como bioindicador. Com pesquisas frequentemente limitadas a dias ou a algumas estações do ano, e a diferentes tipos de praia, o presente estudo trouxe informações essenciais que devem ser consideradas antes da realização das amostragens. Características como biomassa e tamanho corporal (comprimento e largura da carapaça) mostraram-se sensíveis às variações sazonais e aos diferentes tipos de praia, sendo fundamental considerá-las para evitar vieses. Fatores sazonais, como a disponibilidade de recursos alimentares, ciclos reprodutivos e a muda, influenciaram essas variações, e os resultados do presente estudo poderão trazer novas perspectivas para a literatura científica.

Em relação à contaminação por plásticos, a composição alimentar de *O. quadrata* foi alterada, destacando-se a redução no consumo de insetos. Essa diminuição na ingestão de alimentos naturais sugere uma interferência nas relações tróficas nas praias arenosas, afetando a dinâmica entre as teias alimentares marinhas e terrestres. Estudos futuros podem consolidar essa espécie como um bioindicador na avaliação de meso e microplásticos em praias arenosas.

Quanto à utilização de *O. quadrata* como bioindicador, no primeiro capítulo foi apresentado o estressor relacionado ao índice de urbanização, que, de maneira geral, teve um efeito negativo sobre o caranguejo, com a largura da carapaça sendo a única medida estatisticamente significativa. Por outro lado, no segundo capítulo, foi analisado um estressor específico, a supressão da vegetação das praias, e todas as medidas obtidas do caranguejo (tocas, medidas corporais e fisiológicas) foram significativas. Isso indica que a diminuição da vegetação impacta negativamente a saúde do animal. Por fim, o terceiro capítulo demonstra que o potencial estressor dos plásticos tem afetado a composição alimentar e poderá, futuramente, impactar a saúde do animal.

Diante dos resultados desses três capítulos, *O. quadrata* parece responder de maneira mais eficaz a estressores específicos (como vegetação e plásticos) em comparação ao índice de urbanização, que considera diversos estressores humanos. Além disso, a análise dos fatores espaciais e temporais é crucial, pois as respostas do caranguejo podem variar conforme o local e a época do ano em que as amostragens são realizadas. Isso evidencia que a aplicação do caranguejo como bioindicador requer cautela, uma vez que as respostas podem ser influenciadas tanto pelo tipo de estressor quanto pelo contexto espacial e temporal.

APÊNDICE A – Espécimes de *Ocypode quadrata* em laboratório e em campo

I. Medida da largura da carapaça do espécime adulto.



II. Medida da largura da carapaça do espécime juvenil.



III. Atividade de superfície de locomoção noturna do caranguejo-fantasma adulto.



IV. Atividade de superfície noturna de locomoção do caranguejo-fantasma juvenil.



V. Atividade de superfície de manutenção de tocas diurno do caranguejo-fantasma adulto.



VI. Atividade de superfície de locomoção diurna do caranguejo-fantasma juvenil.



VII. Atividade de superfície de forrageamento diurno do caranguejo-fantasma adulto.



APÊNDICE B – Registro de tocas de *O. quadrata*

I. Fechamento da toca em função do aumento da temperatura do ar.



II. Rastreamento de sinal de atividade da toca por escavação. O caranguejo estava na toca e após alguns minutos uma nova abertura foi iniciada.



III. Sinal de atividade de toca: areia ao lado com maior umidade e o registro do caranguejo



IV. Sinal de atividade de toca: areia ao lado com maior umidade e o registro de material antrópico próximo a abertura da toca



V. Sinal de atividade de toca: areia ao lado com maior umidade e o próximo ao material antrópico, o que facilita a interação e ingestão desse material



VI. Medida do diâmetro da toca com auxílio do paquímetro

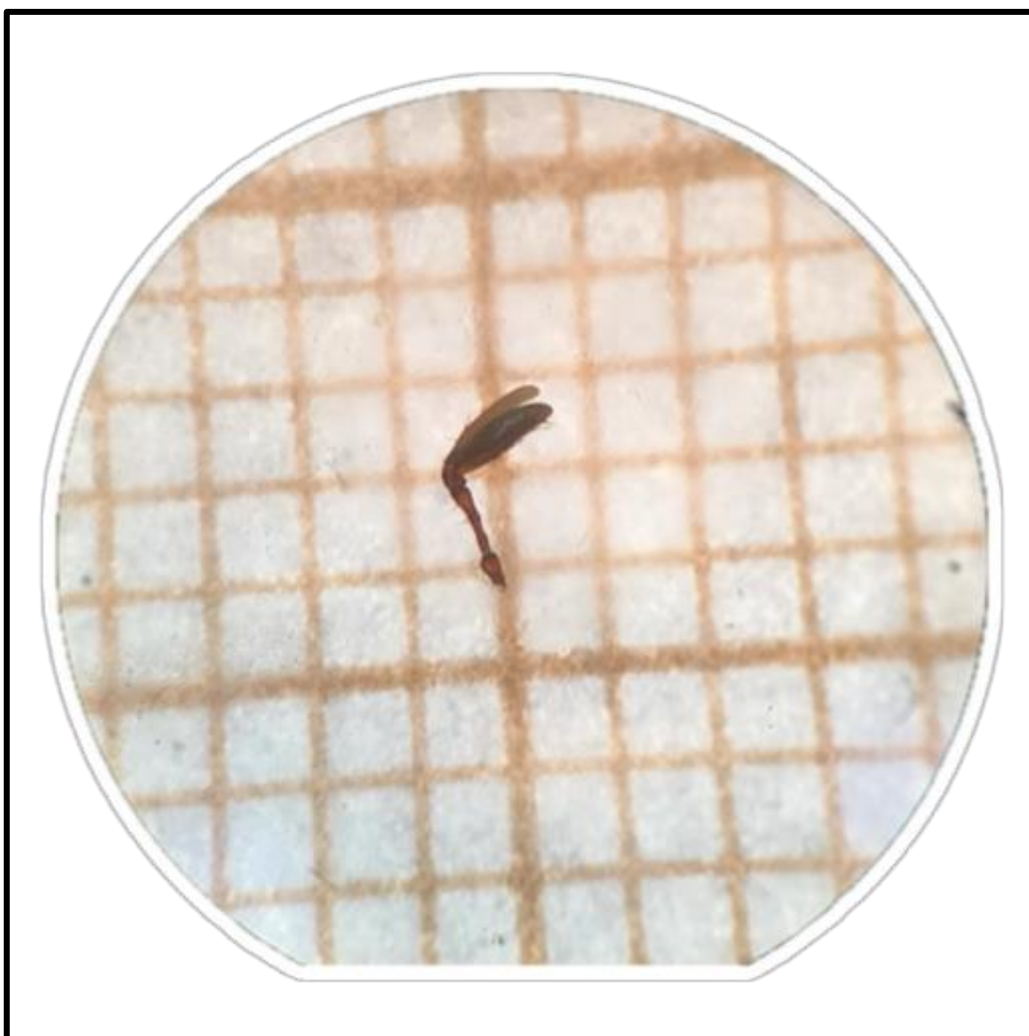


APÊNDICE C – Fotos do estômago de *O. quadrata*

I. Volume do conteúdo estomacal.



II. Identificação do item alimentar do conteúdo estomacal sob o estereomicroscópio.





III. Exemplares de estômago: vazio e cheio



