

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Influência de Estressores Associados às Mudanças
Climáticas no Desenvolvimento Larval de
Platynereis dumerilii (Annelida: Nereididae)**

Lucas Alves da Fonseca

Rio de Janeiro
Julho de 2025

Influência de Estressores Associados às Mudanças Climáticas no Desenvolvimento Larval
de *Platynereis dumerilii* (Annelida: Nereididae)

Lucas Alves da Fonseca

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-graduação em Ciências
Biológicas (Zoologia), Museu Nacional, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Ciências Biológicas
(Zoologia).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Christine Ruta
Coorientadora: Dr^a. Mariana Contins

Rio de Janeiro
Julho de 2025

Influência de Estressores Associados às Mudanças Climáticas no Desenvolvimento Larval
de *Platynereis dumerilii* (Annelida: Nereididae)

Lucas Alves da Fonseca

Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-graduação em Ciências
Biológicas (Zoologia), Museu Nacional, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Ciências
Biológicas (Zoologia).

Aprovada por:

Presidente, Prof^a. Dr^a. Christine Ruta

Prof. Dr. Sergio Luiz Costa Bonecker (Titular interno)

Prof. Dr. Fábio Bettini Pitombo (Titular externo)

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro de Britto (Suplente interno)

Prof. Dr. Wagner Ferreira Magalhães (Suplente externo)

Rio de Janeiro
Julho de 2025

da Fonseca, Lucas Alves.

Influência de Estressores Associados às Mudanças Climáticas no Desenvolvimento Larval de *Platynereis dumerilii* (Annelida: Nereididae) / Lucas Alves da Fonseca. - Rio de Janeiro: UFRJ/Museu Nacional, 2025.

xii, 43f.: il.; 31 cm.

Orientadora:Christine Ruta Coorientadora: Mariana Contins

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ Museu Nacional/Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Zoologia), 2025.

Referências Bibliográficas: f. 39-43.

1. Aquecimento Global. 2. Temperatura. 3. Salinidade. 4. Desenvolvimento inicial. 5. Annelida. I. Ruta, Christine & Contins, Mariana. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Zoologia). III. Influência de Estressores Associados às Mudanças Climáticas no Desenvolvimento Larval de *Platynereis dumerilii* (Annelida: Nereididae)

RESUMO

Alterações nos padrões oceânicos, impulsionadas por mudanças climáticas globais, têm afetado especialmente as fases iniciais de vida de organismos marinhos. Considerando a escassez de conhecimento sobre o desenvolvimento inicial de anelídeos sobre os efeitos de mudanças climáticas e a sua susceptibilidade, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos isolados e sinérgicos da temperatura e da salinidade sobre o desenvolvimento inicial, a sobrevivência e a ocorrência de anomalias morfológicas em larvas de *Platynereis dumerilii*. Foram realizados três experimentos em laboratório: (i) salinidade, com tratamentos de 35 (controle), 30 e 25 a 18 °C; (ii) temperatura, com tratamentos de 18 °C (controle), 25 °C, 30 °C e 35 °C a salinidade constante de 35; e (iii) experimento sinérgico, com sete combinações entre 18 °C e 35 °C e salinidades de 35, 30 e 25. As larvas foram obtidas a partir de fecundações espontâneas sincronizadas com o ciclo lunar. O desenvolvimento larval foi acompanhado até o estágio de nectoqueta. Os resultados indicaram que temperaturas moderadas (25 °C e 30 °C) aceleram o desenvolvimento, enquanto salinidades reduzidas (25) causam atrasos significativos e aumento na incidência de anomalias morfológicas. A exposição a 35 °C resultou em mortalidade total, sugerindo um limite térmico para a espécie. Nos tratamentos combinados, condições moderadas favoreceram o desenvolvimento, enquanto as combinações extremas (35 °C/25) foram letais. Os achados contribuem para o avanço do conhecimento sobre as respostas de invertebrados marinhos de corpo mole, às mudanças climáticas, especialmente do filo Annelida. Campo ainda pouco explorado em comparação aos organismos calcificantes, além de poder servir como referência para futuros estudos experimentais.

Palavras-chave: Aquecimento Global, Temperatura, Salinidade, Desenvolvimento inicial, Annelida.

ABSTRACT

Changes in oceanic patterns driven by global climate change have especially affected the early life stages of marine organisms. Considering the scarcity of knowledge regarding the early development of annelids under the effects of climate change and their susceptibility, the present study aims to evaluate the isolated and synergistic effects of temperature and salinity on early development, survival, and the occurrence of morphological abnormalities in *Platynereis dumerilii* larvae. Three laboratory experiments were conducted: (i) salinity, with treatments of 35 (control), 30, and 25 at 18 °C; (ii) temperature, with treatments of 18 °C (control), 25 °C, 30 °C, and 35 °C at a constant salinity of 35; and (iii) a synergistic experiment, with seven combinations between 18 °C and 35 °C and salinities of 35, 30, and 25. The larvae were obtained through spontaneous fertilizations synchronized with the lunar cycle. Larval development was monitored up to the nectochaete stage. The results indicated that moderate temperatures (25 °C and 30 °C) accelerate development, while reduced salinities (25) cause significant delays and an increase in the incidence of morphological abnormalities. Exposure to 35 °C resulted in total mortality, suggesting a thermal limit for the species. In the combined treatments, moderate conditions favored development, while extreme combinations (35 °C/25) were lethal. The findings contribute to advancing knowledge on the responses of soft-bodied marine invertebrates to climate change, particularly within the phylum Annelida, an area still underexplored compared to studies on calcifying organisms and may serve as a reference for future experimental studies.

Keywords: Climate change, Temperature, Salinity, Early development, Annelida.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Christine Ruta, que desde a graduação vem me orientando e contribuindo decisivamente com seu conhecimento nos meus primeiros passos na pesquisa, pela confiança, atenção e paciência. Agradeço pela dedicação e pelo cuidado com cada etapa deste trabalho.

À minha coorientadora, Dra. Mariana Contins, pela disponibilidade, pelas inúmeras contribuições, que foram muito valiosas e pelo suporte técnico e intelectual ao longo da pesquisa. Esse trabalho não seria o mesmo sem seus conhecimentos experimentais.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

Aos professores Paulo Paiva e João Torres, pelo exímio e essencial auxílio nas análises estatísticas e pelas explicações sempre didáticas, que tornaram os dados menos assustadores e mais compreensíveis.

Aos docentes e à equipe técnica do Programa de Pós-Graduação em Zoologia do Museu Nacional, por todo suporte ao longo do mestrado. Aos professores que ministraram os seminários e acompanhamento e à professora Michelle Klautau, parecerista externa, cujos apontamentos ao meu trabalho foram fundamentais. Meu sincero agradecimento pelas contribuições ao refinamento deste trabalho.

A toda equipe do LABIOM/TaxoN, Roberta, Victor, Meriane, Julia Alves, Yasmin, Ana, Jhenifer e Julia Amante, pela convivência e receptividade ao longo desses anos. Agradeço profundamente pelo ambiente colaborativo e, especialmente, pela parceria durante às coletas de água às 6h da manhã, rs. Minha eterna gratidão, a Delfina, que foi minha companheira de experimentos por longas e longas horas. Agradeço imensamente ao técnico Ricardo pelo auxílios no cultivo e nas coletas de água, assim como ao Wellington, 6h da manhã já pronto para as coletas de água, esse já merece o crachá de integrante honorário pelas inúmeras vezes em que esteve disposto a ajudar, meu sincero reconhecimento pela paciência, competência e disponibilidade constantes.

À minha família, por ser um forte alicerce em todos os momentos. A minha mãe, e aos meus avós, *in memoriam*, por todo amor, pelos valores que me deixaram e pela base que construíram em minha vida. Aos meus amigos, Cadu, Carol, Clara, Davi, Gina, Manu, Mariana, Pâmella, Rachel, Pessini, Sofia, que são abrigo e ânimo, especialmente quando o cansaço ameaçava tomar conta, os respiros fora do universo acadêmico com vocês foram fundamentais para manter o equilíbrio ao longo desses dois anos.

E, por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, passaram por essa caminhada. O meu muito obrigado. Cada gesto de apoio, por menor que pareça, teve total importância no percurso.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Adultos epítocos (maturos sexualmente) de *P. dumerilii* e representação esquemática de seu ciclo reprodutivo. Imagens: ©Martin Gühmann ©Adrien Demilly ©Methiu Legras..... 5
- Figura 2:** Ilustração do procedimento de obtenção de larvas de *P. dumerilii* para os bioensaios *Platynereis dumerilii*. Imagens ©Methiu Legras ©Canva. 9
- Figura 3:** Esquema das baterias de experimento de temperatura, salinidade e sinérgico para *P. dumerilii*..... 10
- Figura 4:** Proporção predita de larvas de *P. dumerilii* por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos de salinidade. Controle: 35; S1: 30; S2: 25 (todos a 18°C)..... 13
- Figura 5:** Probabilidade predita de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos sombreados indicam IC 95%. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25)..... 13
- Figura 6:** Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta nos diferentes tratamentos de salinidade. A área sob a curva (AUC = 0,974) representa a capacidade discriminativa do modelo. 14
- Figura 7:** Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste post-hoc de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25). 14
- Figura 8:** Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos de salinidade. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25). 15
- Figura 9:** Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25). 16
- Figura 10:** Estágios de desenvolvimento de *P. dumerilii* ao longo do experimento. A–D: Larvas sem anomalias morfológicas (controle). E–H: Larvas com anomalias sob salinidade 30. I–L: Larvas com anomalias sob salinidade 25. Escala 100µm..... 17
- Figura 11:** Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos de salinidade. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25). 18

Figura 12: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).	19
Figura 13: Proporção predita de larvas de <i>P. dumerilii</i> por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos de temperatura. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).....	20
Figura 14: Probabilidade predita de larvas de <i>P. dumerilii</i> atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos sombreados indicam IC 95%. Tratamentos: Controle (18 °C, 35), T1 (25 °C, 35), T2 (30 °C, 35), Extra (32,5 °C, 35) e T3 (35 °C, 35).....	21
Figura 15: Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste post-hoc de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).	22
Figura 16: Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de <i>P. dumerilii</i> atingirem o estágio de nectoqueta sob diferentes tratamentos de temperatura. A área sob a curva (AUC = 0,971) representa a capacidade discriminativa do modelo.	22
Figura 17: Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos de temperatura. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).	23
Figura 18: Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).	24
Figura 19: Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos de temperatura. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).....	25
Figura 20: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).	26
Figura 21: Proporção predita de larvas de <i>P. dumerilii</i> por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos sinérgicos. Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).	27
Figura 22: Probabilidade predita de larvas de <i>P. dumerilii</i> atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos	

sombreados indicam IC 95%. Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25)..... 28

Figura 23: Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta nos diferentes tratamentos sinérgicos. A área sob a curva (AUC = 0,901) representa a capacidade discriminativa do modelo. 29

Figura 24: Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste post-hoc de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30 °C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25 °C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25). 29

Figura 25: Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos sinérgicos. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25). 30

Figura 26: Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25). 31

Figura 27: Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos sinérgicos. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25). 32

Figura 28: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25). 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores médios ($\pm$ desvio padrão) dos parâmetros físico-químicos registrados durante o bioensaio de salinidade..... 12

Tabela 4: Anomalias morfológicas observadas em larvas de *P. dumerilii* sob diferentes condições salinidade e temperatura. T: Temperatura, S: Salinidade. Tratamentos: C (Controle: 18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25)..... 17

Tabela 2: Valores da média e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos para os tratamentos de temperatura..... 20

Tabela 3: Valores da média e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos para os tratamentos sinérgicos. 27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

amnf	Água do Mar Natural Filtrada
C	Controle
GLM	Modelo Linear Generalizado
hpf	Horas Pós Fertilização
IB	Instituto de Biologia
IC	Índice de Confiabilidade
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ROC	<i>Receiver Operating Characteristic</i>
S	Salinidade
Sin	Sinérgico
T	Temperatura
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UVR	Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	7
2.1. Objetivo Geral.....	7
2.2. Objetivo Específicos.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
3.1. Obtenção de larvas.....	8
3.2. Bioensaios.....	9
3.3. Parâmetros avaliados e monitoramento	10
3.4. Análises estatísticas	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1. Bioensaio de Salinidade	12
Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio de salinidade.....	12
Efeitos da salinidade reduzida sobre o desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i>	12
Efeitos da baixa salinidade na sobrevivência larval de <i>P. dumerilii</i>	15
Efeitos deletérios da diminuição da salinidade no desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i> ..	16
4.2. Bioensaio de Temperatura	19
Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio de temperatura	19
Efeitos do aumento de temperatura no desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i>	20
Efeitos do aumento de temperatura na sobrevivência larval de <i>P. dumerilii</i>	23
Efeitos deletérios do aumento de temperatura no desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i> ..	24
4.3. Bioensaio Sinérgico	26
Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio sinérgico.....	26
Efeito sinérgico no desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i>	27
Efeito sinérgico na sobrevivência larval de <i>Platynereis dumerilii</i>	30
Efeitos deletérios sinérgico no desenvolvimento larval de <i>P. dumerilii</i>	31
5. DISCUSSÃO	33
5.1 Efeitos da salinidade.....	34
5.2 Efeitos da temperatura	35
5.3 Efeitos Sinérgicos e Considerações Ecológicas	36
6. CONCLUSÕES	38
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas globais estão impactando os oceanos, resultando em alterações na salinidade e na temperatura, conforme destacado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2019). A intensificação das mudanças climáticas tem sido atribuída principalmente às atividades antrópicas (Jonsson, 2014) como, a queima de combustíveis fósseis, que se intensificou a partir da Revolução Industrial e tem levado a um acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera (Brierley & Kingsford 2009). Esses gases que incluem o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor d'água (H_2O), por exemplo, são os responsáveis pela manutenção das condições climáticas que tornam a Terra habitável, regulando assim, a temperatura do planeta (Filonchyk *et al.*, 2024). Quando em grande quantidade, esses gases absorvem a radiação infravermelha refletida pela Terra e acabam aprisionando uma grande quantidade de calor, fazendo com que a temperatura do planeta aumente (Ledley *et al.*, 1999).

A absorção de aproximadamente 90% de calor presente na atmosfera terrestre pelos oceanos (Domingues *et al.*, 2008; IPCC, 2019), tem levado o aumento da temperatura média de suas águas superficiais, afetando as características físico-químicas do ambiente marinho. Esse fenômeno possui tendência em se intensificar cada vez mais nas regiões tropicais e de altas latitudes ao longo do século XXI (IPCC, 2021). Um outro evento de aumento da temperatura são as ondas de calor, elas elevam a temperatura da superfície do mar de forma extrema e persistindo por dias, e tem se tornado cada vez mais frequentes e intensas (IPCC, 2019). Um fator igualmente importante é a salinidade, previsões indicam que o ciclo hidrológico quando alterado pode aumentar a salinidade em baixas latitudes e tornar as águas mais salobras em regiões de latitudes mais altas (Helm *et al.*, 2010). Entretanto, alterações de salinidade não são homogêneas, em regiões em que ela já é elevada, ela vem se intensificando, enquanto em áreas em que a salinidade é mais baixa ela tem reduzido cada vez mais (Schmitt, 2008).

Os diferentes estágios do desenvolvimento de invertebrados marinhos apresentam graus distintos de vulnerabilidade, sendo os estágios iniciais da vida os mais sensíveis às alterações ambientais (Jackson & Strathmann, 1981; Zhan *et al.*, 2016). Muitos invertebrados marinhos apresentam reprodução com fertilização externa e estágio larval planctônico, tornando as características físico-químicas da água do mar fundamentais para seu desenvolvimento. Deste modo, flutuações em variáveis como temperatura, salinidade,

pH e concentração de CO₂ podem ocasionar complicações que afetem diretamente a fisiologia e o modo de vida desses organismos (Byrne, 2011). Essas complicações podem comprometer diversos processos biológicos, levando a condições como acidose, hipercapnia, hipóxia e enfraquecimento do esqueleto, especialmente em organismos que utilizam carbonato de cálcio (CaCO₃) na formação de conchas e estruturas esqueléticas, como corais e moluscos (Pörtner, 2010; Wang, 2014).

Mudanças nos parâmetros físico-químicos dos oceanos, como temperatura e salinidade, podem causar alterações no comportamento, desenvolvimento e distribuição de invertebrados marinhos como já apontado por diversos autores. Przeslawski *et al.* (2005) ao estudarem gastrópodes intertidais identificaram que a interação entre altas temperaturas, salinidades extremas e radiação UVR intensifica significativamente a mortalidade embrionária. Quinn (2017) observou que temperaturas acima de 26 °C comprometem a sobrevivência e o desenvolvimento larval da lagosta *Homarus americanus* H. Milne Edwards, 1837, afetando o recrutamento da espécie. Schäfer *et al.* (2021) mostraram que a medusa *Aurelia solida* Browne, 1905 apresenta uma boa plasticidade fisiológica, tolerando uma grande variação ambiental, com reprodução e crescimento larval favorecidos em condições moderadas. E mais recente, Contins *et al.* (2023, 2025) ao estudarem o desenvolvimento larval do ouriço endêmico *Cassidulus mitis* Krau, 1954 e da estrela do mar *Echinaster (Othilia) brasiliensis* (Müller & Troschel, 1842) verificaram que altas temperaturas afetam negativamente a sobrevivência larval e o crescimento de assentados.

Embora os estudos sobre invertebrados marinhos sejam relativamente bem documentados, trabalhos sobre anelídeos poliquetas ainda são escassos, e a maioria se concentra nos efeitos isolados de estressores, como acidificação e temperatura, apurando respostas fisiológicas não associadas às mudanças climáticas (Gray, 1976; Ushakova & Sarantchova, 2004; Kupriyanova & Havenhand, 2005; David & Simon, 2014; Harvey *et al.*, 2014). Considerando que o desenvolvimento inicial desses organismos é particularmente suscetível a variações ambientais (Rouse & Pleijel, 2006), essa lacuna de estudos que agreguem múltiplos estressores associados às mudanças do clima limita o entendimento dos efeitos desse processo na viabilidade, dispersão e recrutamento das populações desses organismos. Estudar os efeitos das mudanças climáticas no desenvolvimento inicial de invertebrados nos informa não apenas o sucesso dos indivíduos, mas a dinâmica populacional, as interações ecológicas e a distribuição das espécies, tornando-se uma

temática relevante diante do cenário atual de transformações climáticas nos oceanos (Hoegh-Guldberg & Pearce, 1995; O'Connor *et al.*, 2007).

Annelida é um filo diverso, compreende uma grande diversidade de invertebrados segmentados com pouco mais de 17 mil espécies já descritas (Zhang, 2013). São encontrados em uma variedade de ambientes, incluindo ecossistemas terrestres úmidos, zonas entremarés e estuários, distribuem-se desde fundos consolidados e inconsolidados, até habitats mais específicos como tubos, bancos de algas a fontes hidrotermais. Apresentam uma grande variedade de formas e tamanhos, variando de poucos milímetros a vários metros (Rouse & Pleijel, 2001, 2006). Segundo estudos filogenéticos mais recentes, baseados em dados moleculares, os anelídeos são divididos em dois grupos monofiléticos: Errantia, com hábitos de vida livre e mais ativos, e Sedentaria, agrupando espécies de hábitos predominantemente sésseis (Weigert & Bleidorn, 2016).

Os anelídeos ocupam diferentes níveis da cadeia trófica devido à ampla variedade de estratégias alimentares, que incluem filtradores, carnívoros, detritívoros, herbívoros e parasitas (Randall, 1967; Amaral & Migotto, 1980). São amplamente utilizados como bioindicadores, por serem sensíveis às alterações ambientais sejam impactos antrópicos ou naturais (Santi & Tavares, 2009; Soares-Gomes *et al.*, 2022). Além de atuarem como indicadores de diversidade bentônica e organismos modelo em estudos ecológicos e evolutivos (Dean, 2008). Algumas espécies apresentam elevada tolerância a estressores ambientais, como variações de salinidade, temperatura e oxigenação, o que reforça sua importância ecológica e bioindicadora (Surugiu, 2005; Capa & Hutchings, 2021).

Os poliquetas apresentam uma ampla diversidade de estratégias reprodutivas, que variam quanto ao número de eventos reprodutivos ao longo da vida, podendo ser iteróparos (com múltiplas reproduções) ou semélparos (com reprodução única), quanto ao tipo de desenvolvimento, que pode ser direto ou indireto, e quanto ao modo alimentar larval, que pode ser planctotrófico, com larvas que se alimentam no plâncton, ou lecitotrófico, quando as larvas dependem das reservas vitelínicas. Além disso, o habitat das fases larvais e adultas pode ser bentônico ou pelágico. Nos poliquetas, que possuem hábito predominantemente aquático, a fecundação ocorre, em geral, de forma externa, e o desenvolvimento indireto caracteriza-se pela formação de uma larva trocófora, estágio larval típico do grupo (Rouse & Pleijel, 2006; Brusca & Brusca, 2018).

O desenvolvimento dos poliquetas envolve transformações morfológicas, fisiológicas e ecológicas significativas. O estágio larval, de vida livre, proporciona vantagens relacionadas à dispersão, favorecendo a colonização de novos habitats, a redução da competição por recursos na fase adulta e, conseqüentemente, contribuindo para processos de especiação (Pechenik, 1999; Rouse & Pleijel, 2006). O assentamento larval é frequentemente mediado por estímulos ambientais, que podem ser físicos, químicos ou biológicos, e determinam se o organismo irá se estabelecer em determinado substrato. A metamorfose ocorre após o assentamento ou, em alguns casos, pode ser iniciada ainda durante a fase pelágica. Esse processo é caracterizado pela perda de estruturas larvais e pela aquisição de traços morfológicos típicos das fases juvenil ou adulta (Fenaux & Pedrotti, 1988; Rouse & Pleijel, 2006).

Platynereis dumerilii é um poliqueta marinho errante, pertencente à família Nereididae, possui cerca de 35 mm, e são encontrados comumente em profundidades a partir dos 10 m. Esta espécie quando juvenil muda o hábito de vida de pelágica para bentônica, construindo tubos, geralmente em áreas com a presença de grama marinha ou em fundo consolidado coberto de algas pardas, verdes ou vermelhas, as quais são usadas tanto para a alimentação, quanto para a produção de seus tubos (Gambi *et al.*, 2000; Özpölat *et al.*, 2021).

A espécie apresenta dimorfismo sexual entre machos e fêmeas. A fecundação ocorre de forma externa e a embriogênese se dá de maneira rápida, sincronizada com o ciclo lunar, completando-se em cerca de 24 horas. Após a fecundação, o zigoto permanece à deriva na coluna d'água, envolto por uma camada gelatinosa protetora, até que se desenvolva em larva. O desenvolvimento larval compreende três estágios principais: trocófora, metatrocófora e nectoqueta. A trocófora é uma larva lecitotrófica e pelágica, que utiliza um cinturão de cílios para natação. Na fase seguinte, metatrocófora, o corpo adquire formato cônico, resultado do início do desenvolvimento dos segmentos corporais, com crescimento acelerado de cílios, musculatura e parapódios. No terceiro estágio, nectoqueta, a larva atinge um tamanho aproximadamente duas vezes maior, apresenta o trato digestivo completamente funcional e apêndices cefálicos como antenas e cirros e inicia a transição da vida pelágica para bentônica. A fase de assentamento ocorre no sedimento, momento em que o organismo começa a crescer, adicionando novos segmentos na região posterior e passando a construir um tubo para sua proteção. Embora seja uma espécie tubícola, *P. dumerilii* é capaz de abandonar temporariamente o tubo em situações de estresse, realocação, busca por alimento

ou durante o período de maturação sexual (Fischer & Dorresteijn, 2004; Kuehn *et al.*, 2019) (Figura 1).

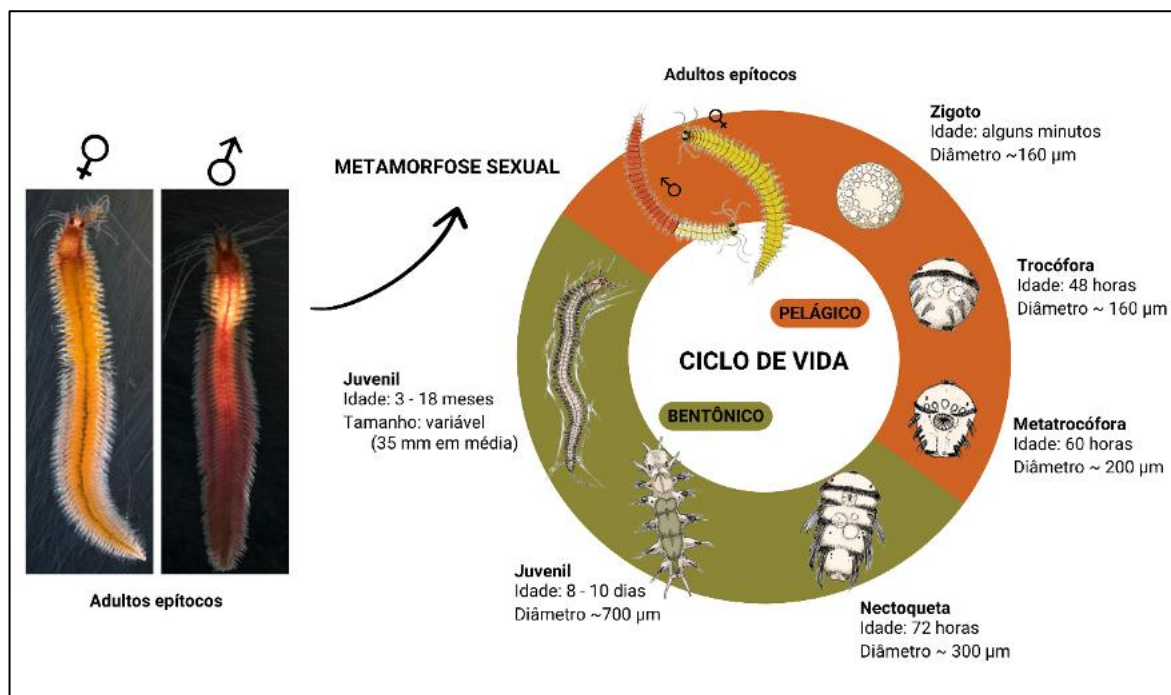


Figura 1 Adultos epítocos (maturos sexualmente) de *P. dumerilii* e representação esquemática de seu ciclo reprodutivo. Imagens: ©Martin Gühmann ©Adrien Demilly ©Methiu Legras.

Platynereis dumerilii tem sido amplamente utilizado como organismo modelo, principalmente devido a características específicas de seus embriões, como a transparência, abundância e tamanho, além de evidências que sugerem uma evolução relativamente lenta de sua linhagem, mantendo características ancestrais dentro dos anelídeos (Fischer *et al.*, 2010). Devido a essas características, *P. dumerilii* é amplamente utilizado em diversas áreas da pesquisa que envolvem bioensaios, incluindo biologia do desenvolvimento (Dorresteijn, 1990; Ribeiro *et al.*, 2025), biologia evolutiva (Song *et al.*, 2020), biologia regenerativa (Stockinger *et al.*, 2024), reprodução (Fischer & Dorresteijn, 2004), neurociência (Wulf *et al.*, 2025), ecologia (Hardege, 1999; Cameron *et al.*, 2024) e toxicologia (Hutchinson *et al.*, 1995). Os estudos baseados em cultivo da espécie remontam à década de 1950, na Europa, pelo zoólogo Carl Hauenschield, quem deu início ao primeiro cultivo de *P. dumerilii*, e desde então mostrou que o ciclo de vida pode ser mantido em laboratório, desde que as condições de luminosidade, temperatura, densidade populacional e alimentação, sejam controladas de forma adequada (Fischer *et al.*, 2010; Kuehn *et al.*, 2019).

Embora os poliquetas desempenhem papéis ecológicos cruciais em ambientes marinhos bentônicos, os estudos que abordam os efeitos de estressores ambientais sobre suas larvas ainda são relativamente escassos e fragmentados. Gray (1976) investigou larvas trocóforas de *Serpula vermicularis* Linnaeus, 1767 e demonstrou que a mortalidade é influenciada pela interação entre salinidade e temperatura, com maior tolerância em larvas em estágios mais avançados. Em *Nereis (Alitta) virens* M Sars, 1835, Ushakova & Sarantchova (2004) observaram que a fertilização e o desenvolvimento larval ocorrem em faixas restritas de salinidade (22–34), com aumento da tolerância nos estágios posteriores. Tosuji & Sato (2005) mostraram que larvas de *Hediste japonica* (Izuka, 1908) e *H. diadroma* Sato & Nakashima, 2003 possuem desenvolvimento ideal em salinidades entre 22,5 e 30, sendo a segunda espécie mais tolerante e com fase pelágica mais longa. Em *Marenzelleria viridis* (Verrill, 1873), Bochert *et al.* (1996) identificaram que o crescimento larval e a sobrevivência são favorecidos por salinidades entre 10–25 e temperaturas de 10–15 °C, sendo a metamorfose inviável abaixo de salinidade 5.

Outros estudos reforçam a importância dessas variáveis no sucesso larval. *Ophryotrocha diadema* Åkesson, 1976 mostrou-se estenoalína, com desenvolvimento completo apenas em salinidade entre 30 e 40 e temperaturas entre 15–25 °C, sendo a salinidade 35 e temperatura em 25 °C a mais favorável (Åkesson & Costlow, 1978). Em *Spirorbis spirorbis* (Linnaeus, 1758) e *Circeis spirillum* (Linnaeus, 1758), Ushakova (2003) observou que a sobrevivência larval foi maior em baixas temperaturas (5 °C) e salinidades moderadas (20–30), com baixa taxa de metamorfose em salinidade abaixo de 15. Em *Hydroides dirampha* Mörch, 1863, Liu *et al.* (2020) verificaram altas taxas de crescimento e assentamento larval mesmo sob salinidades reduzidas (20–26) e temperaturas elevadas (28 °C). Já Qiu & Qian (1997) descreveram que *Hydroides elegans* (Haswell, 1883) sofre deformações progressivas no desenvolvimento em salinidades abaixo de 25. Quanto à temperatura, *Arenicola marina* (Linnaeus, 1758) apresentou crescimento larval ideal em 15 °C, sendo comprometido em extremos térmicos (Broquard *et al.*, 2022). Campbell *et al.* (2014) revelaram que a acidificação oceânica (pH 7,47–7,77) potencializa os efeitos tóxicos do cobre em *A. marina*, reduzindo fertilização e sobrevivência larval. Sánchez-Ovando *et al.* (2023) documentaram altas taxas de anomalias em embriões de *Spirobranchus incrassatus* Krøyer in Mörch, 1863 e *S. cf. corniculatus* (Grube, 1862) sob 32 °C, com mortalidade total em 34 °C. David & Simon (2014) observaram que larvas adelfofágicas de *Polydora hoplura* Claparède, 1868 e *Boccardia proboscidea* Hartman, 1940 possuem maior tolerância térmica

do que larvas planctotróficas, sendo o desenvolvimento mais rápido em temperaturas elevadas (24–28 °C), porém com menor sobrevivência. Igualmente para espécies poecilógonas na qual observaram que o tempo de incubação e o tipo de larva produzida também é influenciado pela temperatura com implicações diretas para dispersão e recrutamento local. David (2021) notou que poliquetas perfuradores de conchas, especialmente spioniídeos como *P. hoplura*, tendem a aumentar sua infestação em moluscos sob cenários de aquecimento e acidificação, sugerindo que esses estressores podem favorecer sua adaptação em detrimento dos hospedeiros. Por fim, em *Ophryotrocha labronica* La Greca & Bacci, 1962, Jarrold *et al.* (2019) relataram efeitos transgeracionais em resposta a temperaturas elevadas (30 °C) e salinidade alta (39), com *trade-offs* entre crescimento, longevidade e fecundidade.

Diante da intensificação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas marinhos, compreender como esses fatores interferem no ciclo de vida de organismos bentônicos é fundamental, em especial durante a fase larval, reconhecidamente mais sensível. Esse conhecimento é fundamental para compreender os impactos ecológicos, evolutivos e funcionais decorrentes desse processo. Nesse contexto, o presente estudo busca ampliar esse conhecimento utilizando *Platynereis dumerilii*, espécie pertencente a um grupo ainda subexplorado sob essa perspectiva, ainda que se destaquem pela sua diversidade trófica, sensibilidade a variações ambientais e adaptabilidade a condições de estresse, o que os torna particularmente relevantes como modelos ecológicos e bioindicadores colocando os anelídeos poliquetas como o organismos-chave para o monitoramento ecológico e para a compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre comunidades bentônicas.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

Investigar os efeitos do aumento de temperatura e da redução de salinidade sobre o tempo de desenvolvimento, a sobrevivência e a ocorrência de anomalias morfológicas em larvas de *P. dumerilii*, do estágio de prototrocófora ao de nectoqueta, com base em cenários projetados pelo IPCC.

2.2. Objetivo Específicos

- ❖ Avaliar os efeitos das variações isoladas e sinérgicas de temperatura e salinidade sobre o desenvolvimento de *P. dumerilii*, com foco em alterações morfológicas subletais e deletérias.
- ❖ Quantificar a sobrevivência larval de *P. dumerilii* em resposta a variações de temperatura e salinidade, considerando efeitos individuais e interativos desses estressores ambientais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção de larvas

Os experimentos foram realizados no Laboratório TaxoN (IB/UFRJ) a partir de espécimes de *P. dumerilii* adquiridos do cultivo estabelecido desde 2019, segundo protocolo adaptado (Kuehn *et al.*, 2019), conforme implementado no laboratório. As larvas foram obtidas de fecundações espontâneas e monitoradas até o estágio de nectoqueta. A fecundação foi realizada com dois machos e duas fêmeas selecionados com base em critérios como: locomoção ativa, coloração viva e ausência de danos físicos. Os espécimes para a fecundação foram colocados em recipientes plásticos estéreis com 300 mL de água do mar natural filtrada (amnf) para liberação dos gametas. Após 24 horas pós-fertilização (hpf) as larvas trocóforas foram lavadas com amnf sob uma peneira de 85 µm para remoção da camada gelatinosa que se forma após a liberação do esperma. Em seguida as larvas foram transferidas para um novo recipiente contendo a mesma quantidade de amnf, para que possa ser feita a contagem de larvas presentes (Figura 2). Posteriormente os recipientes são transferidos para a incubadora, onde são mantidos sob as temperatura a serem testadas.

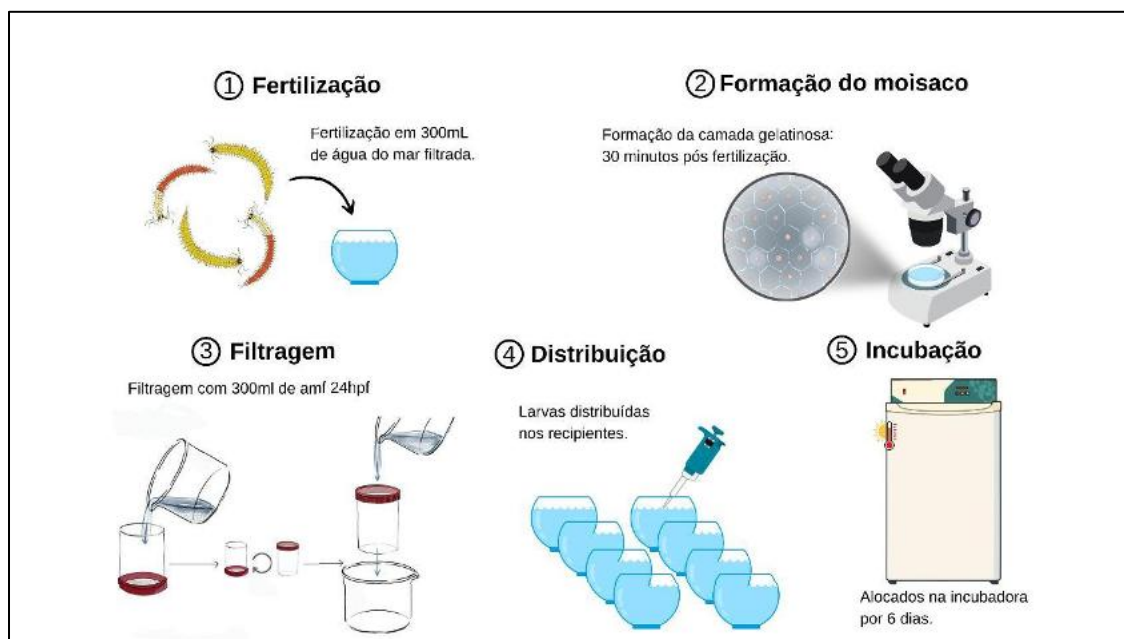


Figura 2: Ilustração do procedimento de obtenção de larvas de *P. dumerilii* para os bioensaios *Platynereis dumerilii*. Imagens ©Methiu Legras ©Canva.

3.2. Bioensaios

Os bioensaios foram realizados em recipientes plásticos contendo 180 mL de amnf, cada um com aproximadamente 360 larvas de *Platynereis dumerilii*. As larvas foram obtidas por fecundação externa envolvendo dois machos e duas fêmeas, selecionados com base em coloração, integridade corporal e atividade natatória. Para estimar o número total de larvas geradas, foram coletadas três alíquotas de 1 mL da suspensão inicial, realizando-se a contagem de larvas em cada uma. A média foi utilizada para estimar o número total de indivíduos e alocá-los proporcionalmente nas unidades experimentais por meio de regra de três.

Três conjuntos de experimentos foram conduzidos (Figura 3):

- **Salinidade (S):** Controle (18 °C, 35), S1 (18 °C, 30) e S2 (18 °C, 25);
- **Temperatura (T):** Controle (18 °C, 35), T1 (25 °C, 35), T2 (30 °C, 35), T3 (35 °C, 35), além de um experimento adicional a 32,5 °C com o objetivo de verificar um possível limiar de inviabilidade térmica ou se a resposta larval ocorre de forma progressiva;
- **Sinérgico (combinação entre temperatura e salinidade):** Controle (18 °C, 35), Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30 °C, 30), Sin3 (35 °C, 30), Sin4 (25 °C, 25), Sin5 (30 °C, 25), Sin6 (35 °C, 25).

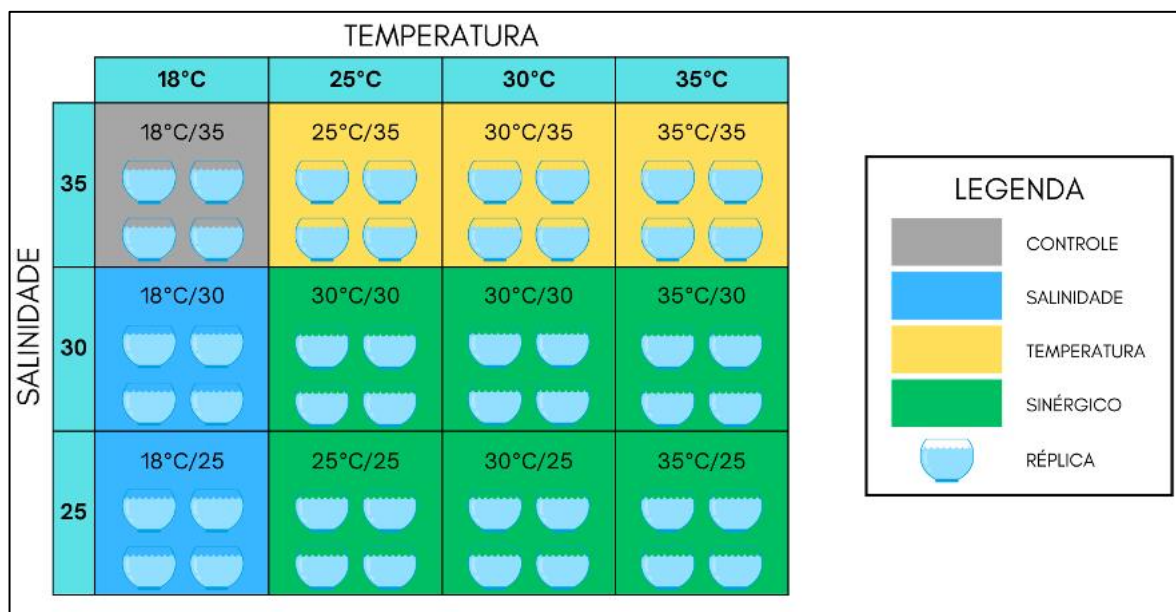


Figura 3: Esquema das baterias de experimento de temperatura, salinidade e sinérgico para *P. dumerilii*.

Cada tratamento foi realizado com quatro réplicas, totalizando 12 unidades experimentais para salinidade, 16 para temperatura e 28 para os tratamentos sinérgicos. Os recipientes foram mantidos em incubadora com controle de temperatura, ajustada com base nas projeções do IPCC (2019) para o final do século XXI, simulando um aumento de até 5 °C sobre a temperatura padrão de 18 °C, conforme Kuehn *et al.* (2019). Cada experimento teve duração de aproximadamente uma semana, assim como o tempo de exposição das larvas nas condições experimentais.

3.3. Parâmetros avaliados e monitoramento

Durante os experimentos, os parâmetros físico-químicos da água foram monitorados diariamente para garantir a estabilidade das condições experimentais. A temperatura foi medida com termômetro digital pHEP®5 Hanna, a salinidade com refratômetro manual K52-100, e o pH foi verificado pontualmente durante os ensaios com um medidor de pH digital pHEP®5 Hanna.

As avaliações biológicas ocorreram a cada 48 horas, sempre no mesmo horário, utilizando microscópio estereoscópico Olympus SZX7, e incluíram:

- Proporção de larvas por estágio de desenvolvimento (prototrocófora, trocófora, metatrocófora e nectoqueta);
- Taxa de sobrevivência;
- Presença de anomalias morfológicas externas subletais e deletérias: deformações observadas que, embora não letais, comprometem a integridade funcional do organismo (subletais) ou acarretam danos graves às suas funções vitais (deletérias).

Ao final dos bioensaios, as larvas foram fixadas em solução de Lugol a 4% e fotografadas com auxílio de microscópio óptico Zeiss AxioSkop HBO 50W, acoplado à câmera digital Sony DSC WX350, para posterior documentação morfológica.

3.4. Análises estatísticas

A análise do tempo de desenvolvimento foi realizada por meio da regressão logística binária, considerando a proporção de larvas que atingiram o estágio de nectoqueta como variável resposta. A sobrevivência e a ocorrência de anomalias no desenvolvimento foram analisadas separadamente por meio de modelos lineares generalizados (GLM) com distribuição binomial (Crawley, 2005), considerando como variável resposta a proporção de indivíduos vivos em relação ao total (vivos + mortos), por unidade experimental, e a proporção de indivíduos saudáveis em relação ao total (saudáveis + anômalas). As análises foram realizadas no software R (R Core Team 2023). Os *Odds Ratios* e seus intervalos de confiança de 95% foram calculados para interpretar o efeito dos tratamentos sobre a sobrevivência.

Para as comparações entre as diferentes combinações de temperatura e salinidade, foi utilizado por meio do pacote emmeans comparações múltiplas *post hoc*, com ajuste de Tukey para controle do erro tipo I. A adequação dos modelos foi avaliada por meio da inspeção de gráfico QQ-plot e da análise dos resíduos versus valores ajustados. Para a interpretação visual dos resultados, foram utilizados gráficos de estimativas pontuais com intervalos de confiança, além da representação por letras de significância (*compact letter display*), incluindo análises descritivas e visualizações dos dados preditos e ajustados, complementando a análise inferencial.

4. RESULTADOS

4.1. Bioensaio de Salinidade

Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio de salinidade

Durante o bioensaio de salinidade, a temperatura manteve-se estável, com média de $18,37 \pm 0,33$ °C. As salinidades médias nos tratamentos controle, S1 e S2 foram de $35,67 \pm 0,98$, $30,67 \pm 0,98$ e $25,67 \pm 0,98$, respectivamente. O pH variou entre $7,93 \pm 0,17$ e $8,04 \pm 0,20$, sem flutuações relevantes (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios ($\pm$ desvio padrão) dos parâmetros físico-químicos registrados durante o bioensaio de salinidade.

Parâmetros Tratamento	Temperatura (°C)	Salinidade	pH
Controle	18.37 ± 0.33	35.67 ± 0.98	7.93 ± 0.17
S1 (30)	18.35 ± 0.33	30.67 ± 0.98	7.96 ± 0.13
S2 (25)	18.41 ± 0.33	25.67 ± 0.98	8.04 ± 0.2

Efeitos da salinidade reduzida sobre o desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

A proporção de larvas que atingiram o estágio de nectoqueta variou entre os tratamentos. Observou-se atraso no desenvolvimento em salinidade 25, com maior concentração de indivíduos nos estágios iniciais ao longo do experimento. Em salinidades 30 e 35, a progressão larval foi mais rápida, com aumento gradativo de larvas nos estágios avançados (Figura 4).

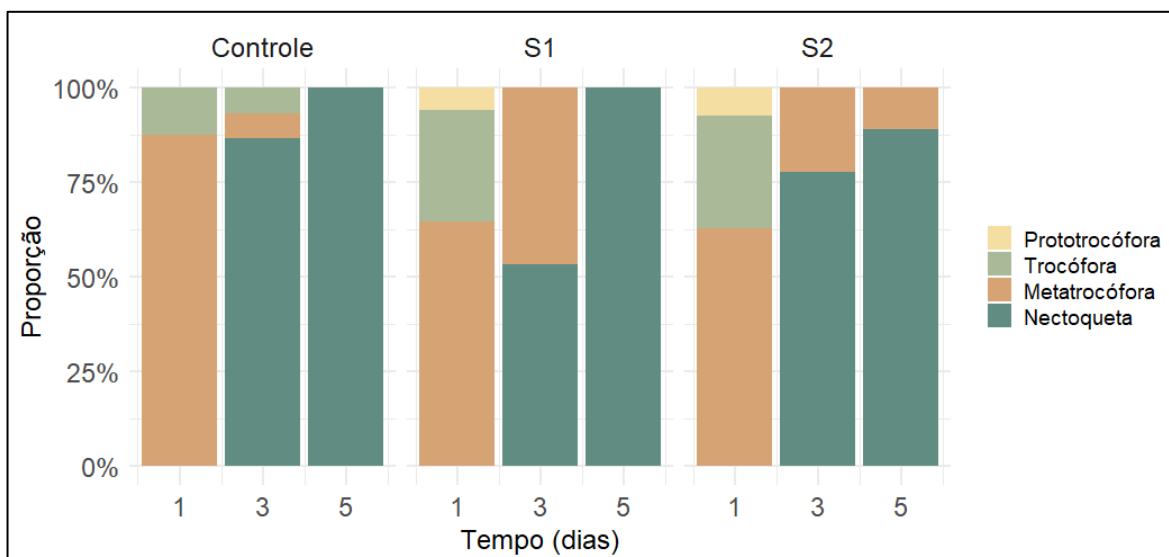


Figura 4: Proporção predita de larvas de *P. dumerilii* por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos de salinidade. Controle: 35; S1: 30; S2: 25 (todos a 18°C).

A regressão logística binária indicou efeito significativo do tempo sobre a probabilidade de as larvas atingirem o estágio de nectoqueta ($p < 0,001$). Quanto à salinidade, os tratamentos S1 (30) e S2 (25) apresentaram *odds ratios* de 0,26 (IC 95%: 0,06–1,04) e 0,28 (IC 95%: 0,05–1,33), respectivamente, indicando menor chance de desenvolvimento até o estágio final em comparação ao controle (35), embora sem significância estatística ($p > 0,05$) (Figura 5).

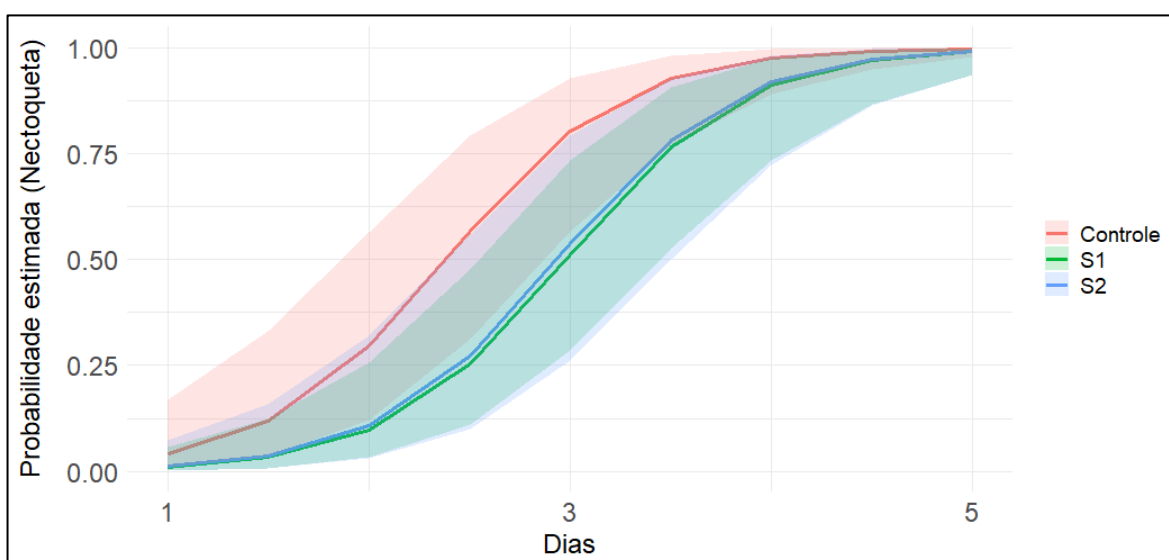


Figura 5: Probabilidade predita de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos sombreados indicam IC 95%. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

A performance do modelo foi avaliada por meio da curva ROC, com área sob a curva (AUC) de 0,974, indicando uma boa capacidade preditiva (Figura 6).

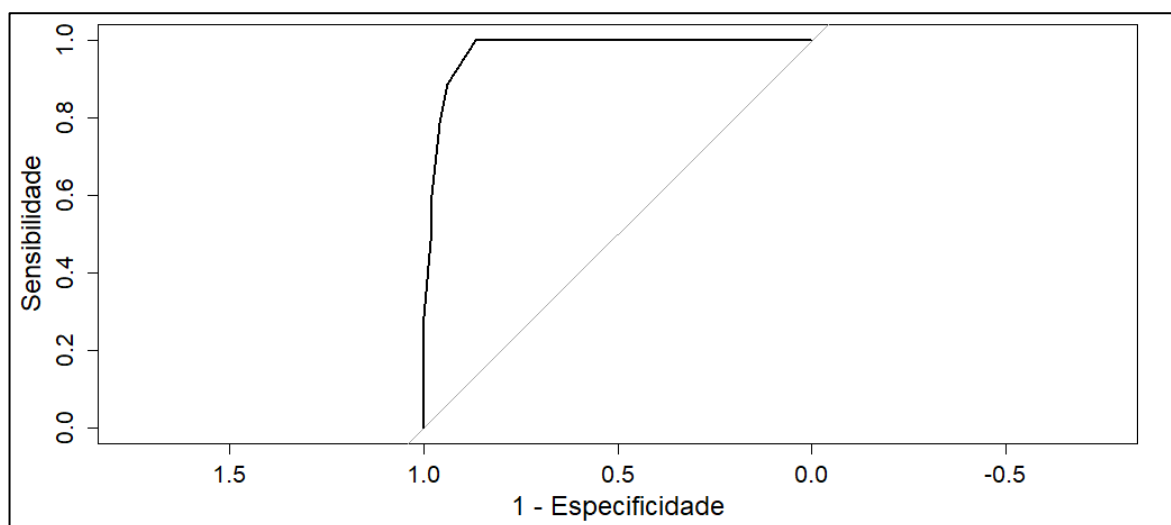


Figura 6: Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta nos diferentes tratamentos de salinidade. A área sob a curva (AUC = 0,974) representa a capacidade discriminativa do modelo.

As comparações post-hoc com ajuste de Tukey entre os tratamentos, realizadas a partir das estimativas marginais geradas pelo modelo (pacote emmeans no R), não indicaram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,1$) (Figura 7).

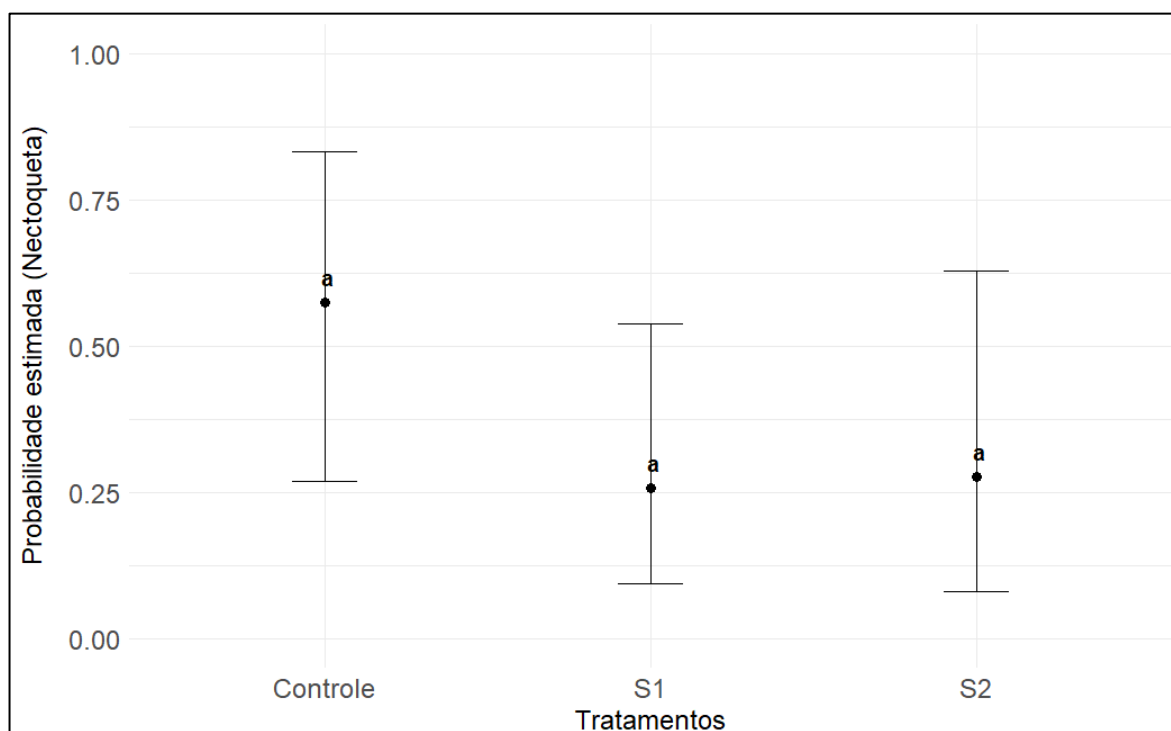


Figura 7: Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste *post-hoc* de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

Os dados obtidos sugerem que *P. dumerilii* apresenta tolerância relativa à redução de salinidade em curto prazo, não apresentando comprometimento significativo no desenvolvimento até o estágio de nectoqueta sob as condições testadas.

Efeitos da baixa salinidade na sobrevivência larval de *P. dumerilii*

O modelo indicou de forma significativa que a salinidade afeta a probabilidade de sobrevivência das larvas ($\chi^2 = 15.79$, $df = 2$, $p < 0.001$) (Figura 8).

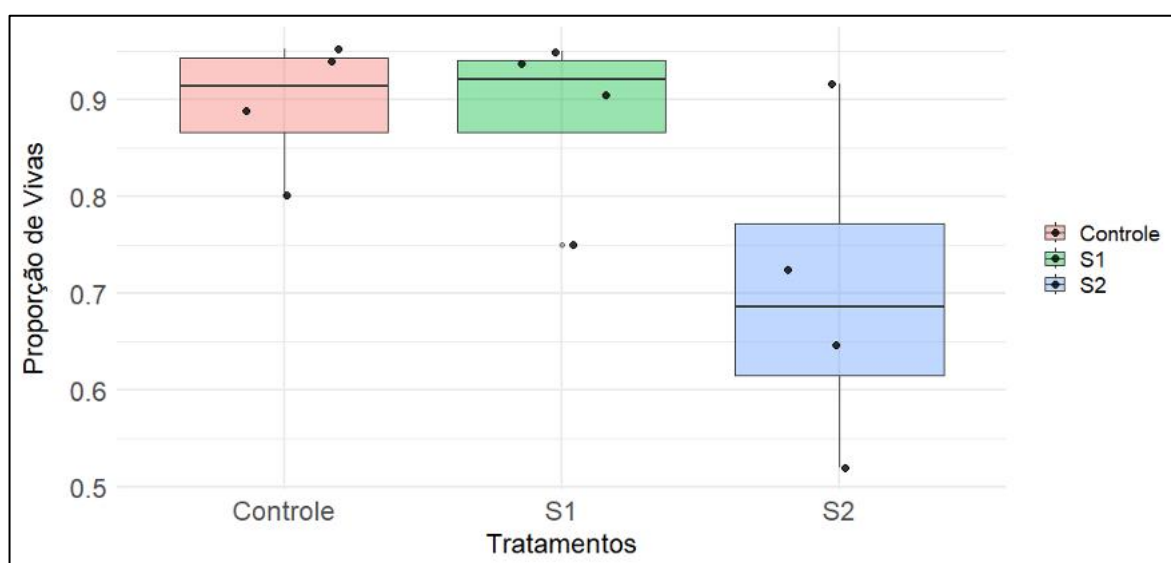


Figura 8: Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos de salinidade. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

Não foram observadas diferenças significativas na sobrevivência larval entre o tratamento S1 (30) e o controle (35) (OR = 0.73, IC 95%: 0.26–2.00, $p = 0.536$). No entanto, o tratamento S2 (25) revelou uma diferença estatisticamente significativa (OR = 0.23, IC 95%: 0.09–0.52, $p = 0.0007$), indicando que salinidade reduzida afeta negativamente a sobrevivência das larvas.

As comparações post-hoc com ajuste de Tukey confirmam o padrão observado: não houve diferença significativa entre o controle e o tratamento S1 ($p = 0.81$), porém o tratamento S2 diferiu significativamente do controle ($p = 0.017$) (Figura 9).

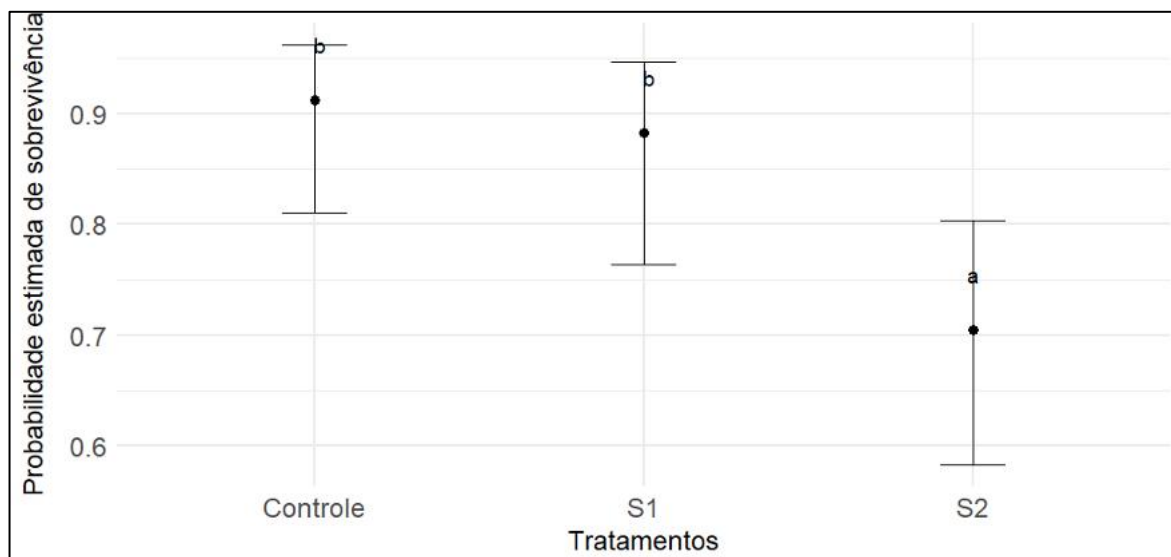


Figura 9: Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

Esses resultados indicam que as larvas de *P. dumerilii* toleram salinidade de 30, mas são sensíveis a reduções mais acentuadas (salinidade 25), o que pode ocorrer diante de cenários de mudanças climáticas que envolvem aumento do aporte de água doce nos mares e eventos de diluição costeira.

Efeitos deletérios da diminuição da salinidade no desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

A exposição à salinidade reduzida induziu anomalias na morfologia externa das larvas de *P. dumerilii*. Larvas trocóforas, que normalmente apresentam corpo com morfologia cônico-esférica, exibiram formas deformadas e assimétricas (Figura 10-I). Nos estágios metatrocófora e nectoqueta, caracterizados pela presença de três segmentos bem distintos, foram observadas alterações corporais, incluindo formas amorfas (Figura 10-H), semelhantes a feijão, gota, curvo, além de morfologias achatadas, abaloadas (**Figura 10-L**) e com simetria comprometida (**Figura 10-K**), indicando interferência nos processos de segmentação e desenvolvimento axial.

Também foram observadas anomalias nos parapódios, com ausência em um ou mais segmentos, principalmente no lado esquerdo em vista dorsal (**Figura 10-G**), e disposição assimétrica (**Figura 10-H**). Além disso, houve grande redução na quantidade de cerdas nos parapódios e ausência de olhos em todos os estágios analisados (Tabela 2).

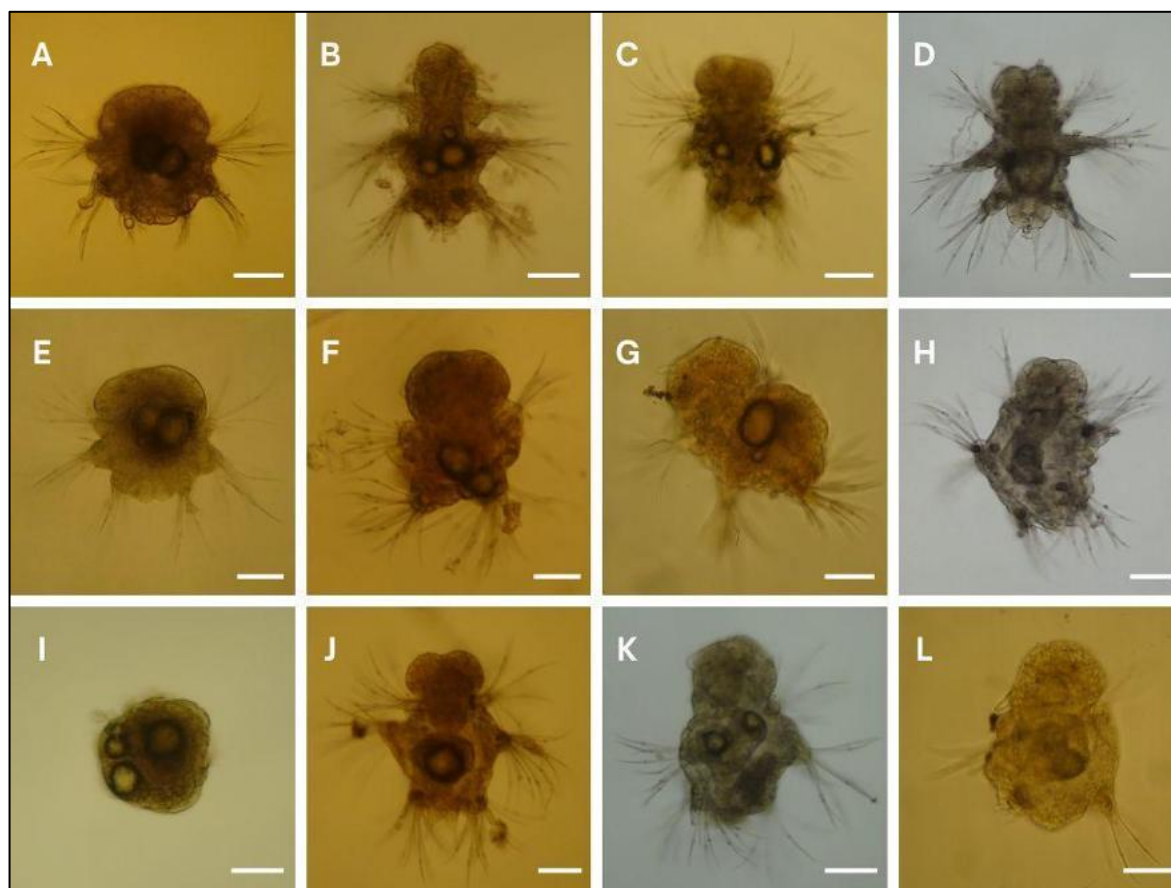


Figura 10: Estágios de desenvolvimento de *P. dumerilii* ao longo do experimento. A–D: Larvas sem anomalias morfológicas (controle). E–H: Larvas com anomalias sob salinidade 30. I–L: Larvas com anomalias sob salinidade 25. Escala 100µm.

Tabela 2: Anomalias morfológicas observadas em larvas de *P. dumerilii* sob diferentes condições salinidade e temperatura. T: Temperatura, S: Salinidade. Tratamentos: C (Controle: 18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Estressor climático	Tratamento	Anomalias
Salinidade e Temperatura	S2 – T2	Corpo esferoidal deformado
Salinidade e Temperatura	C – S2 – T2 – Sin2 – Sin5	Corpo em formato de feijão
Salinidade e Temperatura	S1 – S2 – T2	Corpo em formato de gota
Salinidade e Temperatura	S2 – T2 – Sin1 - C	Corpo curvado
Salinidade e Temperatura	C – Sin1 – Sin4 - Sin5	Corpo quadrangular
Temperatura	T2 – Sin1 – C	Corpo ovalado
Temperatura	T1 – Sin1 – Sin5	Segmentos alargados
Temperatura	T1	Corpo alongado
Salinidade e Temperatura	C – T2 – S2 – Sin1 - Sin4 - Sin2	Corpo achatado
Salinidade e Temperatura	Sin1	Corpo abalado
Temperatura	C – T2 – T2 – Sin1 – Sin2 - Sin5	Corpo amorfo
Salinidade e Temperatura	C – Sin1 – Sin4	Ausência de segmentação
Salinidade	S2 – S3 – Sin1 – Sin5	Simetria irregular
Salinidade	S2 – S3 – C – Sin1 – Sin5	Ausência de parapódios
Salinidade e Temperatura	S2 – T1 – Sin1	Parapódio anômalos
Salinidade e Temperatura	S2 – T2 – Sin2	Disposição irregular dos parapódios
Temperatura	C – T1 – T2 – Sin1 – Sin4 – Sin2 - Sin5	Redução do número de cerdas
Salinidade e Temperatura	T2 – S2 – S3 – Sin2 – Sin5	Disposição irregular dos olhos
Salinidade e Temperatura	S2 – S3 – T1 – T2 – Sin1 – Sin4	Ausência de olhos

O modelo indicou de forma significativa que a redução de salinidade afeta a probabilidade de desenvolvimento saudável das larvas (Figura 11). Foi observada uma diferença significativa na ocorrência de anomalias morfológicas entre o tratamento controle (salinidade 35) e o tratamento S2 (salinidade 25) ($p = 0,0367$). No entanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa entre o controle e o tratamento S1 (salinidade 30) ($p = 0,3672$), indicando que os efeitos deletérios sobre o desenvolvimento larval se tornam mais evidentes apenas em condições de salinidade mais baixa.

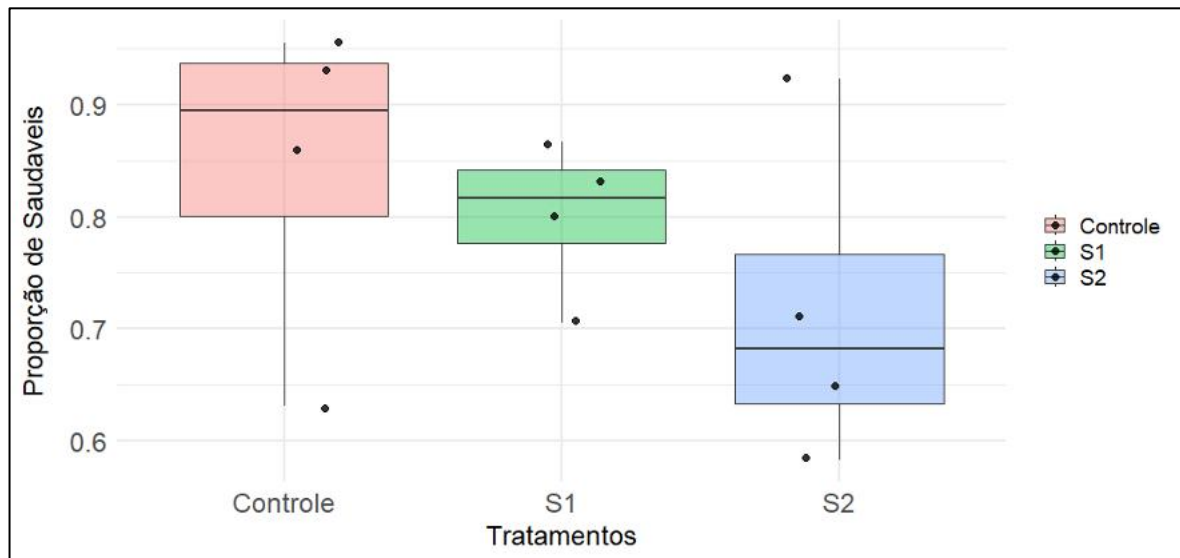


Figura 11: Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos de salinidade. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

As comparações *post-hoc* com ajuste de Tukey confirmaram diferenças significativas entre o controle e os tratamentos S2 (OR = 0,67; IC 95% 0,27–1,61), enquanto o tratamento S1 as chances de formação de anomalias foram significativamente menor comparada ao controle (OR = 0,41; IC 95% 0,17–0,93) (Figura 12).

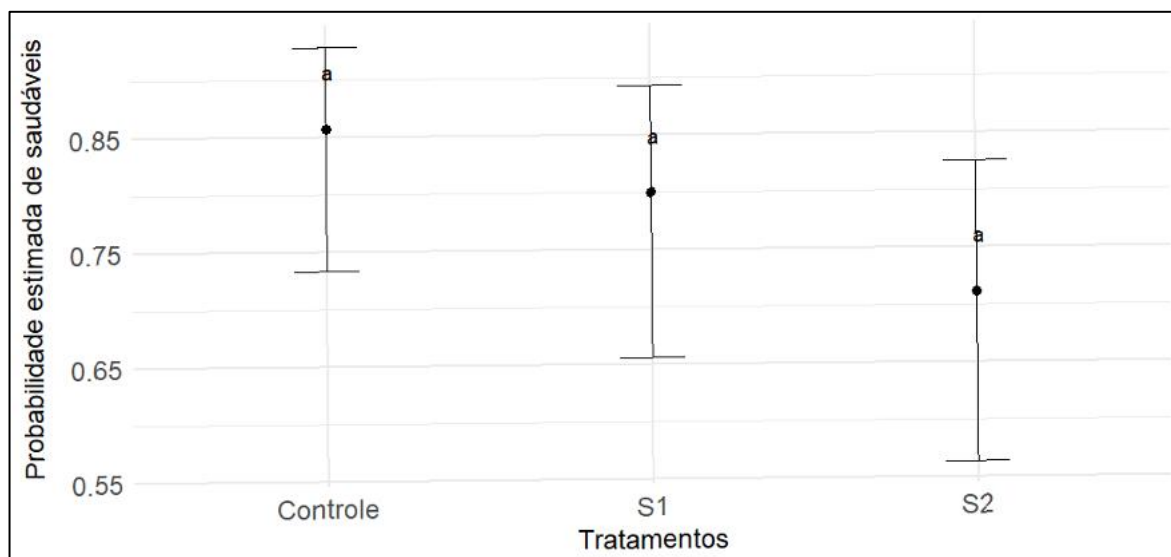


Figura 12: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), S1 (18°C, 30) e S2 (18°C, 25).

Esses resultados evidenciam que a redução de salinidade, especialmente abaixo de 30, pode afetar negativamente o desenvolvimento larval de *P. dumerilii*, promovendo um aumento na ocorrência de anomalias.

4.2. Bioensaio de Temperatura

Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio de temperatura

Durante o bioensaio de temperatura, as temperaturas médias se mantiveram próximas aos valores estabelecidos para cada tratamento: 17.98 ± 0.84 °C (controle, 18 °C), 24.0 ± 0.32 °C (T1, 25 °C), 28.74 ± 0.41 °C (T2, 30 °C), 32.4 ± 0.14 °C (T3, 35 °C) e 30.61 ± 0.35 °C (Extra, 32.5 °C). Apesar da eficiência do controle térmico, as temperaturas observadas nos tratamentos ficaram até 2.6 °C abaixo do esperado, o que pode refletir em imprecisões experimentais em sistemas com aquários. A salinidade teve pequenas variações entre réplicas (de 33.25 ± 1.36 a 35.38 ± 0.57). O pH variou entre 8.04 ± 0.21 a 8.26 ± 0.29 (Tabela 3).

Tabela 3: Valores da média e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos para os tratamentos de temperatura.

Parâmetros Tratamentos	Temperatura (°C)	Salinidade	pH
Controle	17.98 ± 0.84	35.08 ± 0.35	8.04 ± 0.21
T1 (25°C)	24.0 ± 0.32	35.38 ± 0.57	8.26 ± 0.29
T2 (30°C)	28.74 ± 0.41	33.25 ± 1.36	8.12 ± 0.13
Extra (32.5°C)	30.61 ± 0.35	35.33 ± 0.49	8.13 ± 0.09
T3 (35°C)	32.4 ± 0.14	35.0 ± 0.0	8.09 ± 0.07

Efeitos do aumento de temperatura no desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

A análises mostraram que nos tratamentos T1 (25°C), T2 (30°C) e no tratamento extra (32.5°C), a progressão larval apresentou-se de forma mais rápida e com maior presença de larvas nos estágios iniciais até o dia 5. No tratamento T3 (35°C) houve mortalidade total das larvas no primeiro dia (Figura 13).

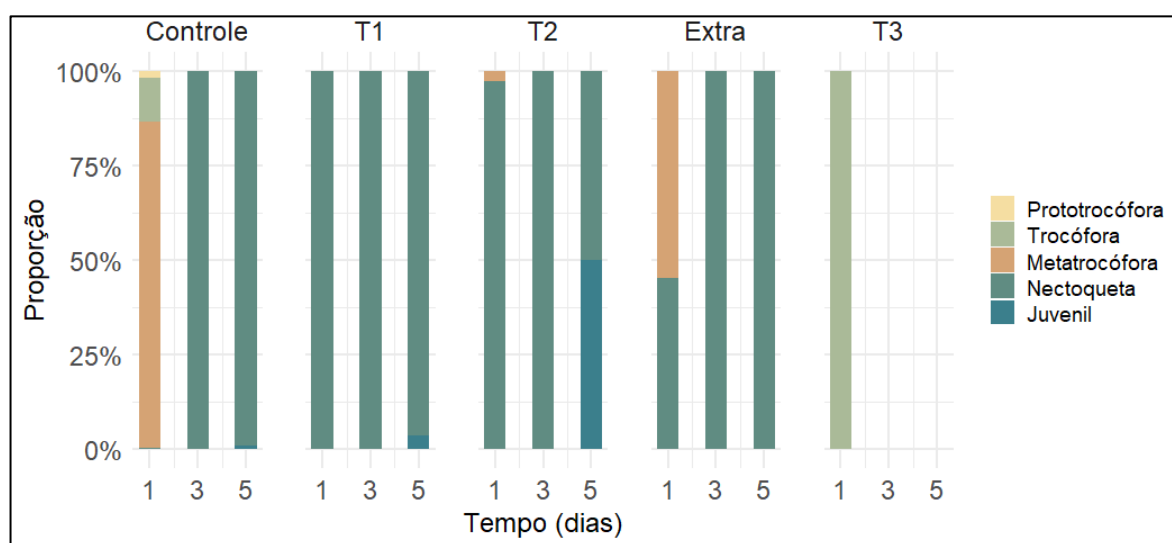


Figura 13: Proporção predita de larvas de *P. dumerilii* por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos de temperatura. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

A regressão logística binária indicou efeito significativo sobre a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* alcançarem o estágio de nectoqueta ($p < 0,001$), com tendência positiva constante, independente do tratamento. O aumento da temperatura também teve efeito significativo no desenvolvimento larval. Os tratamentos T1 (25°C), T2 (30°C) e Extra

(32.5°C) apresentaram maior probabilidade de alcance do estágio final, com *odds ratios* de 622,1 (IC 95% 145,8–2653,1), 32,1 (IC 95% 14,6–70,4) e 10,4 (IC 95% 4,7–22,7), respectivamente (Figura 14).

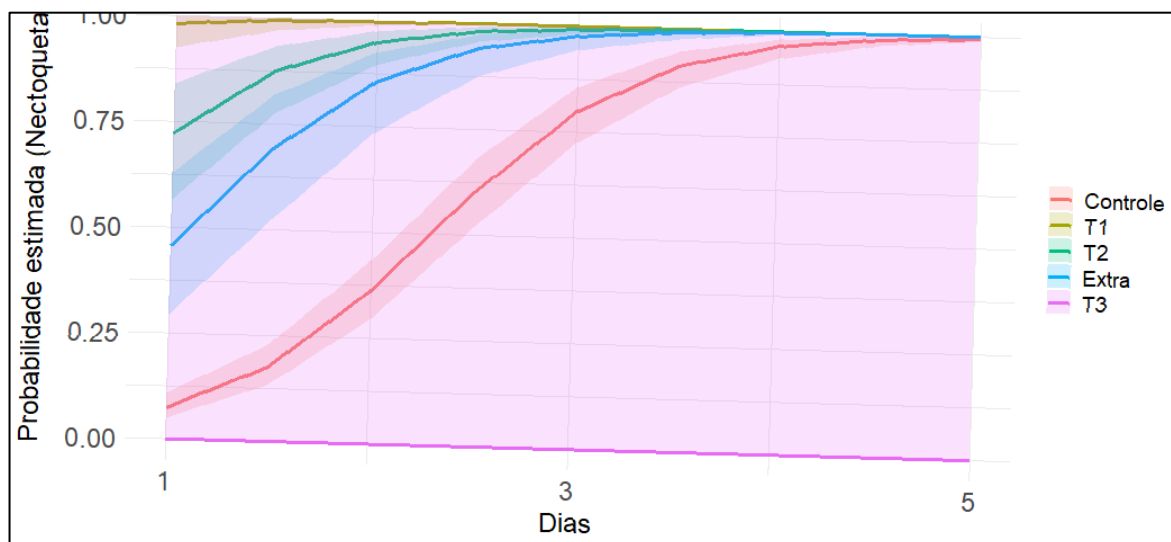


Figura 14: Probabilidade predita de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos sombreados indicam IC 95%. Tratamentos: Controle (18 °C, 35), T1 (25 °C, 35), T2 (30 °C, 35), Extra (32,5 °C, 35) e T3 (35 °C, 35).

Em contraste, o tratamento T3 (35 °C) resultou em mortalidade total das larvas nas primeiras 24 horas, gerando um coeficiente altamente negativo e instável (Estimate = -16,05), sem significância estatística ($p = 0,985$). As comparações múltiplas indicaram que o tratamento T1 (25 °C) apresentou desempenho superior em relação aos tratamentos T2 (30 °C; $p = 0,0018$) e Extra (32,5 °C; $p < 0,0001$). Segundo comparação post-hoc, os tratamentos T2 e Extra são estatisticamente semelhantes, apesar de T2 apresentar uma maior quantidade de larvas sobreviventes (Figura 15).

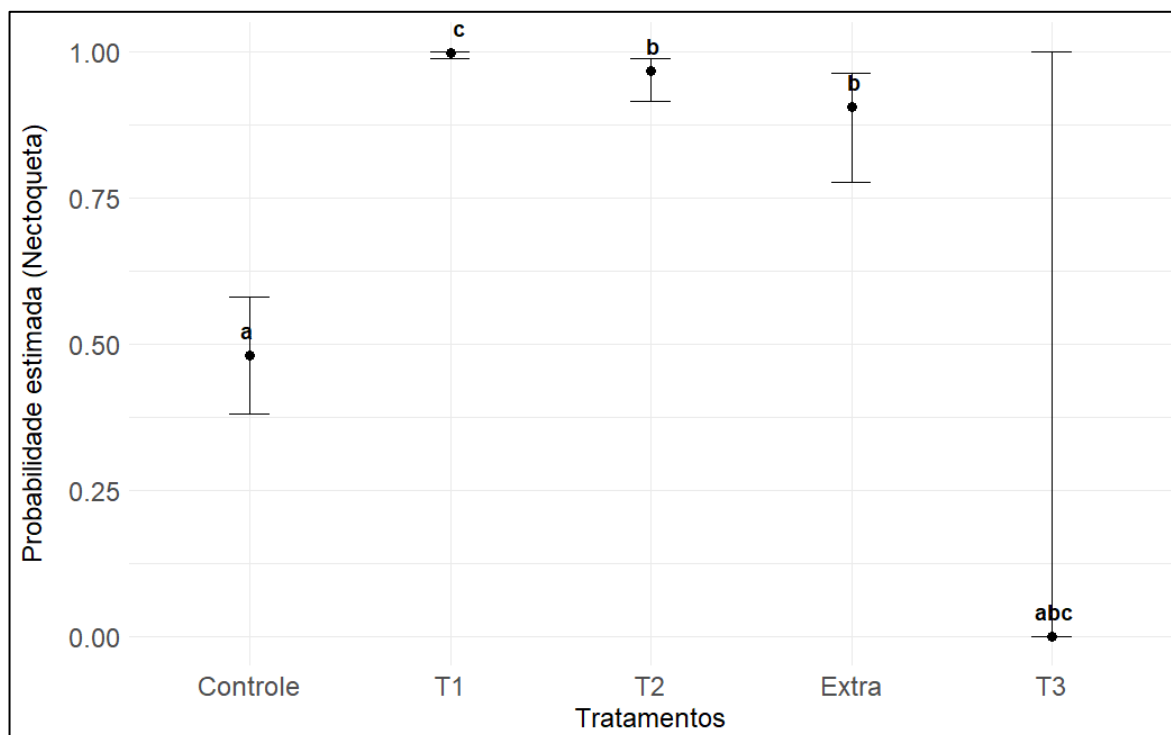


Figura 15: Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste *post-hoc* de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

A performance do modelo foi analisada por meio da curva ROC, com área sob a curva (AUC) de 0,971, indicando uma boa acurácia (Figura 16).

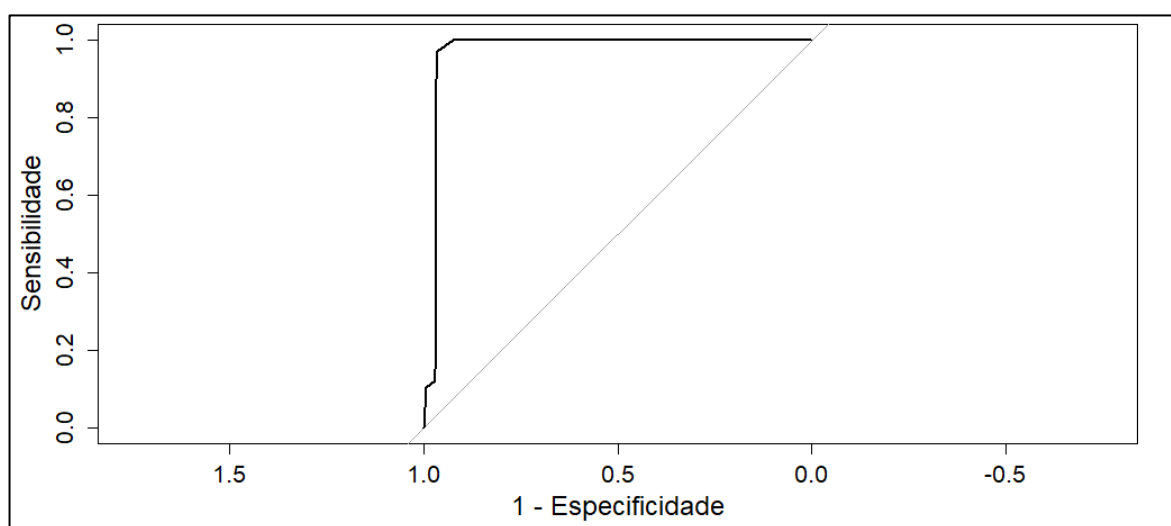


Figura 16: Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta sob diferentes tratamentos de temperatura. A área sob a curva (AUC = 0,971) representa a capacidade discriminativa do modelo.

Efeitos do aumento de temperatura na sobrevivência larval de *P. dumerilii*

O modelo indicou de forma significativa que a temperatura afeta a probabilidade de desenvolvimento saudável das larvas ($\chi^2 = 288.33$, $df = 4$, $p < 0.001$) (Figura 17).

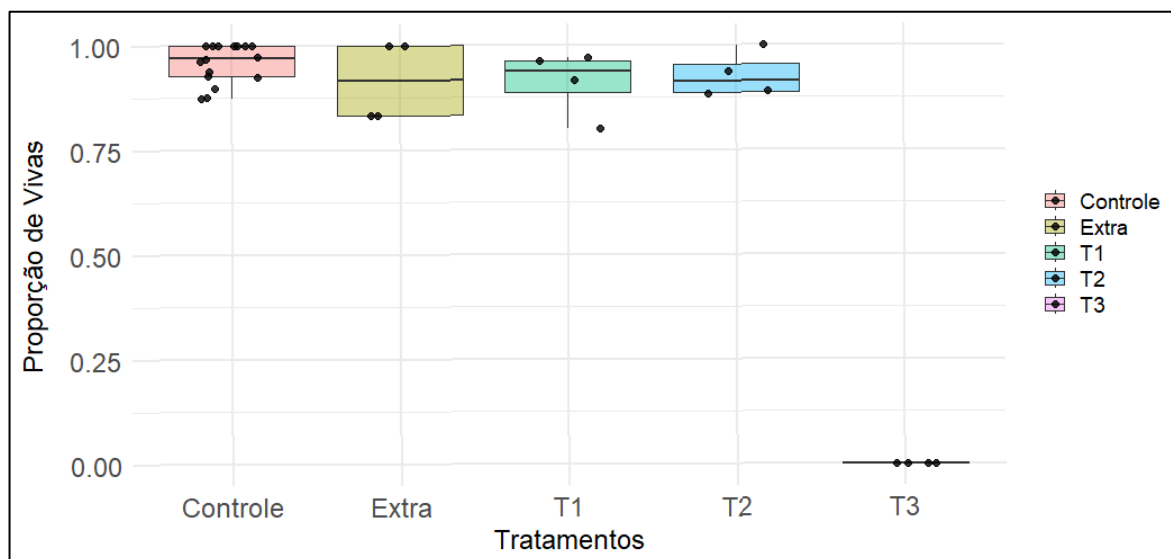


Figura 17: Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos de temperatura. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

Os tratamentos T1 (25 °C) e T2 (30 °C) não apresentaram diferenças significativas na sobrevivência larval, com *odds ratio* de (OR = 0.72, IC 95%: 0.35–1.59, $p = 0.386$) e (OR = 0.52, IC 95%: 0.23–1.33, $p = 0.137$), respectivamente, embora os valores para T2 indiquem uma tendência de diminuição na sobrevivência.

Para o tratamento extra (32.5 °C), verificou-se uma redução significativa na sobrevivência larval (OR = 0.28, IC 95%: 0.11–0.86, $p = 0.0137$). O tratamento T3 (35 °C) foi observada mortalidade total.

As comparações post-hoc com ajuste de Tukey não identificaram diferenças significativas na sobrevivência de larvas entre o controle e os tratamentos T1 e T2 ($p > 0.57$), porém indicaram tendência de redução no experimento extra 32.5°C ($p = 0.0986$) (Figura 18).

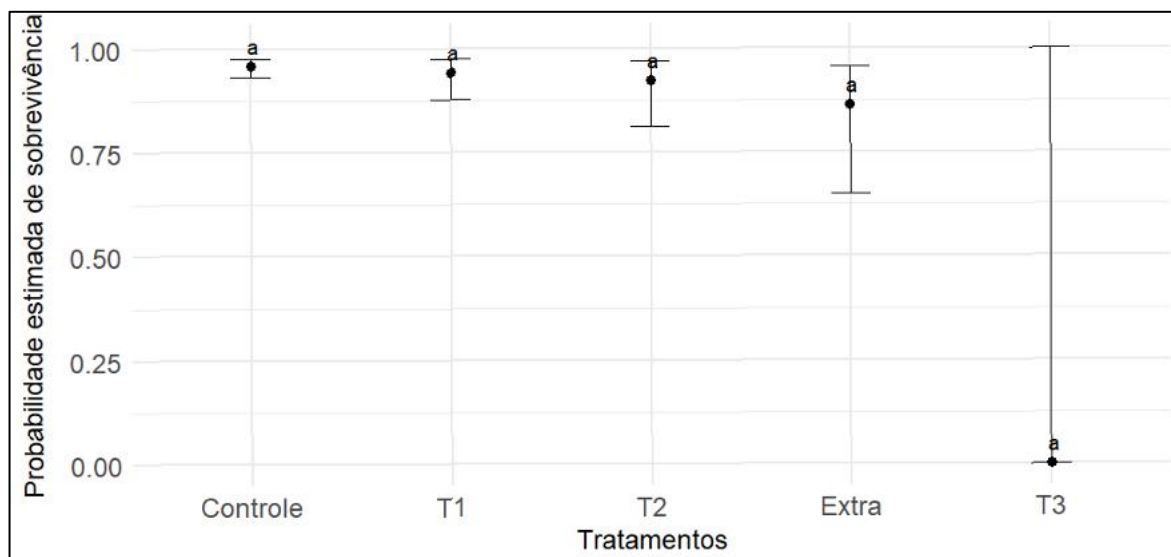


Figura 18: Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

Os resultados indicam que as larvas de *P. dumerilii* toleram temperaturas de até 30 °C sem redução significativa na sobrevivência, no entanto temperaturas acima desse limite, comprometem a viabilidade larval, com mortalidade total observada em 35 °C.

Efeitos deletérios do aumento de temperatura no desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

A exposição das larvas de *P. dumerilii* a temperaturas elevadas também resultou em alterações morfológicas significativas, similares às observadas sob condições de salinidade reduzida. As anomalias incluíram deformações no formato do corpo em todos os estágios, com perda de simetria, alterações no formato do segmento e modificações nos parapódios, como ausência ou disposição irregular em relação ao eixo corpóreo, além da redução de cerdas e ausência de olhos (Tabela 2). Essas alterações tornaram-se mais evidentes com o aumento da temperatura, especialmente nos tratamentos a 30 °C e 32,5 °C, sendo acompanhadas por maior frequência de larvas anômalas no estágio de nectoqueta. No tratamento a 35 °C, a mortalidade precoce impediu a avaliação morfológica, mas indicou comprometimento extremo do desenvolvimento.

O modelo indicou de forma significativa que a temperatura afeta a probabilidade de desenvolvimento saudável das larvas ($\chi^2 = 82.53$, $df = 3$, $p < 0.001$) (Figura 19).

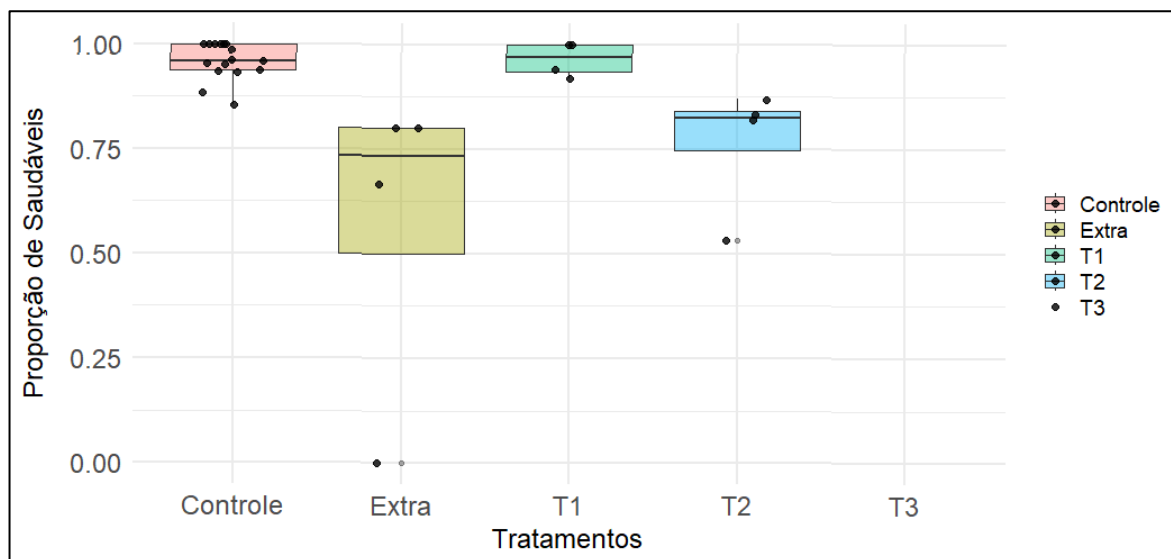


Figura 19: Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos de temperatura. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

O tratamento T1 (25 °C) não apresentou efeito significativo na ocorrência de anomalias (OR = 0.97, IC 95%: 0.47–2.22, $p = 0.947$). Em contrapartida o tratamento T2 (30 °C) demonstrou aumento significativo na frequência de anomalias morfológicas, com *odds ratio* de 0.18 (IC 95%: 0.09–0.34, $p < 0.001$). Assim como, o experimento extra (32.5°C) que apresentou *odds ratio* de 0.15 (IC 95%: 0.08–0.28, $p < 0.001$).

No tratamento T3 (35 °C), não foram registradas anomalias devido à mortalidade total das larvas, o que impossibilitou o cálculo de proporções ou razão de chances.

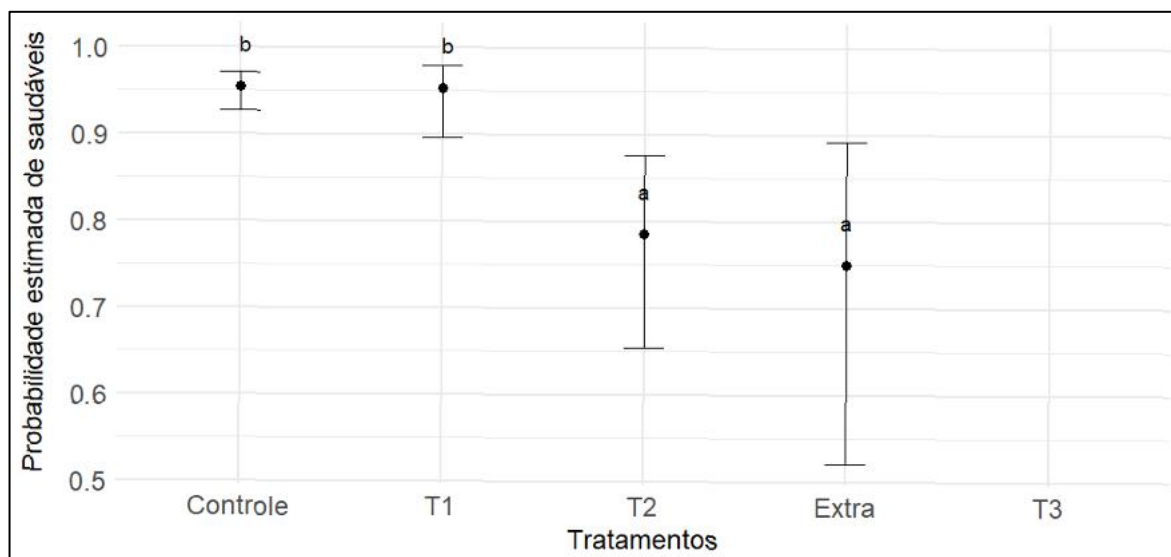


Figura 20: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), T1 (25°C, 35), T2 (30°C, 35), Extra (32,5°C, 35) e T3 (35°C, 35).

As comparações *post-hoc* com ajuste de Tukey confirmaram diferenças significativas entre o controle e os tratamentos T2 e o experimento extra 32.5°C ($p < 0.001$), enquanto o tratamento T3 não diferiu significativamente do controle (Figura 20).

Os resultados indicam que temperaturas iguais ou superiores a 30 °C comprometem o desenvolvimento saudável das larvas, enquanto 25 °C parece manter condições adequadas de desenvolvimento similares ao controle (18 °C).

4.3. Bioensaio Sinérgico

Parâmetros físico-químicos durante o bioensaio sinérgico

Durante os bioensaios do sinérgico as temperaturas mantiveram-se próximas das médias: 18.09 ± 0.82 °C (Controle), 24.04 ± 0.20 °C (Sin1 – 25 °C), 28.85 ± 0.40 °C (Sin2 – 30 °C), 34.02 ± 0.51 °C (Sin3 – 35 °C), 24.37 ± 0.30 °C (Sin4 – 25 °C), 28.77 ± 0.41 °C (Sin5 – 30 °C) e 34.28 ± 0.46 °C (Sin6 – 35 °C). A salinidade, também apresentou boa correspondência com os valores planejados: 34.85 ± 0.43 (Controle), 32.17 ± 2.55 (Sin1 – 30), 27.42 ± 2.27 (Sin2 – 30), 30.25 ± 0.50 (Sin3 – 30), 25.25 ± 0.45 (Sin4 – 25), 24.00 ± 1.54 (Sin5 – 25) e 26.00 ± 0.00 (Sin6 – 25). Pequenas variações, aconteceram nos tratamentos

Sin1 e Sin2, o que reflete a limitações técnicas comuns de sistemas com múltiplos aquários. O pH variou entre 8.05 ± 0.20 e 8.15 ± 0.04 (Tabela 4).

Tabela 4: Valores da média e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos para os tratamentos sinérgicos.

Parâmetros Tratamentos	Temperatura (°C)	Salinidade	pH
Controle	18.09 ± 0.82	34.85 ± 0.43	8.05 ± 0.2
Sin1 (25°C, 30)	24.04 ± 0.2	32.17 ± 2.55	8.13 ± 0.26
Sin2 (30°C, 30)	28.85 ± 0.4	27.42 ± 2.27	8.15 ± 0.04
Sin3 (35°C, 30)	34.02 ± 0.51	30.25 ± 0.5	8.1 ± 0.03
Sin4 (25°C, 25)	24.37 ± 0.3	25.25 ± 0.45	8.11 ± 0.08
Sin5 (30°C, 25)	28.77 ± 0.41	24.0 ± 1.54	8.08 ± 0.09
Sin6 (35°C, 25)	34.28 ± 0.46	26.0 ± 0.0	8.06 ± 0.05

Efeito sinérgico no desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

As análises mostraram que os tratamentos Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30 °C, 30), Sin4 (25°C, 25) e Sin5 (30 °C, 25), a progressão larval apresentou-se de forma mais rápida, com crescimento rápido de larvas no estágio de metatrocófora até o dia 5. Porém nos tratamentos Sin3 (35°C, 30) e Sin6 (35°C, 25), ocorreu mortalidade total das larvas. (Figura 21).

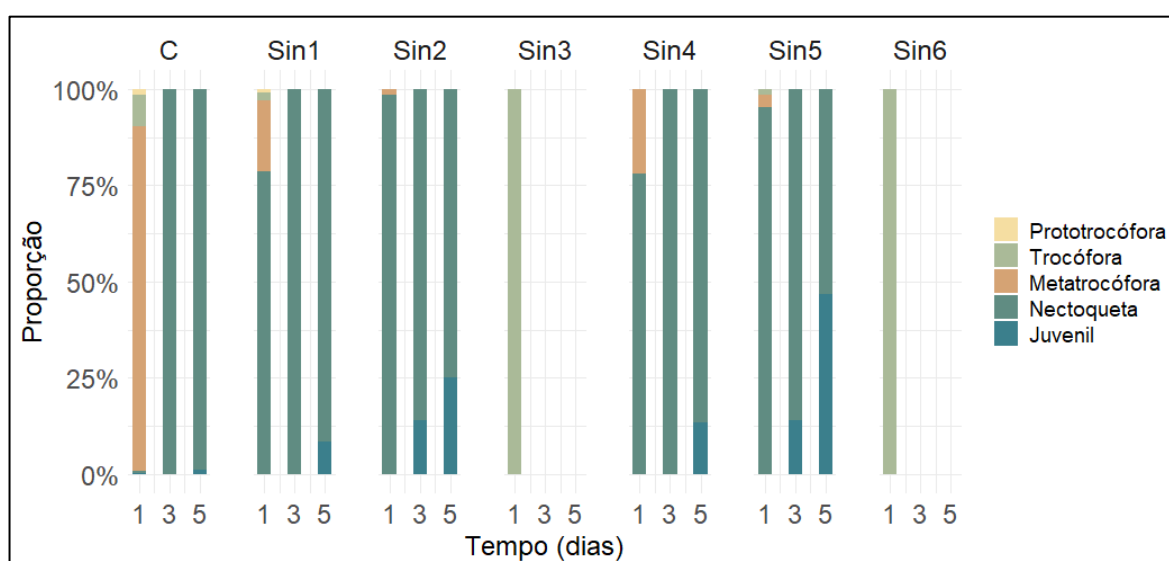


Figura 21: Proporção predita de larvas de *P. dumerilii* por estágio de desenvolvimento ao longo do tempo nos diferentes tratamentos sinérgicos. Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

A análise de regressão logística binária indicou efeito significativo na probabilidade das larvas de *P. dumerilii* alcançarem o estágio de nectoqueta em decorrência do tempo ($p < 0,001$). Esse efeito foi positivo e constante, indicando que o progresso do tempo favorece o desenvolvimento larval, independentemente do tratamento. Notou-se um aumento significativo na influência do desenvolvimento larval sob os tratamentos Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30 °C, 30), Sin4 (25°C, 25) e Sin5 (30 °C, 25), com *odds ratios* de (OR = 17,81; IC 95% 12,14–26,13), (OR = 35,25; IC 95% 17,75–69,89), (OR = 5,31; IC 95% 1,23–22,85) e (OR = 3,51; IC 95% 2,22–5,55), respectivamente ($p < 0,001$), mostrando um crescimento constante e significativo nos tratamentos intermediários. Por outro lado, os tratamentos Sin3 (35 °C, 30) e Sin6 (35 °C, 25) mostraram uma separação completa dos dados, com quase nenhuma larva se desenvolvendo. O que ocasionou em coeficientes altamente negativos e erros padrão elevados, o que impossibilitou o cálculo confiável de seus *odds ratios* (Figura 22).

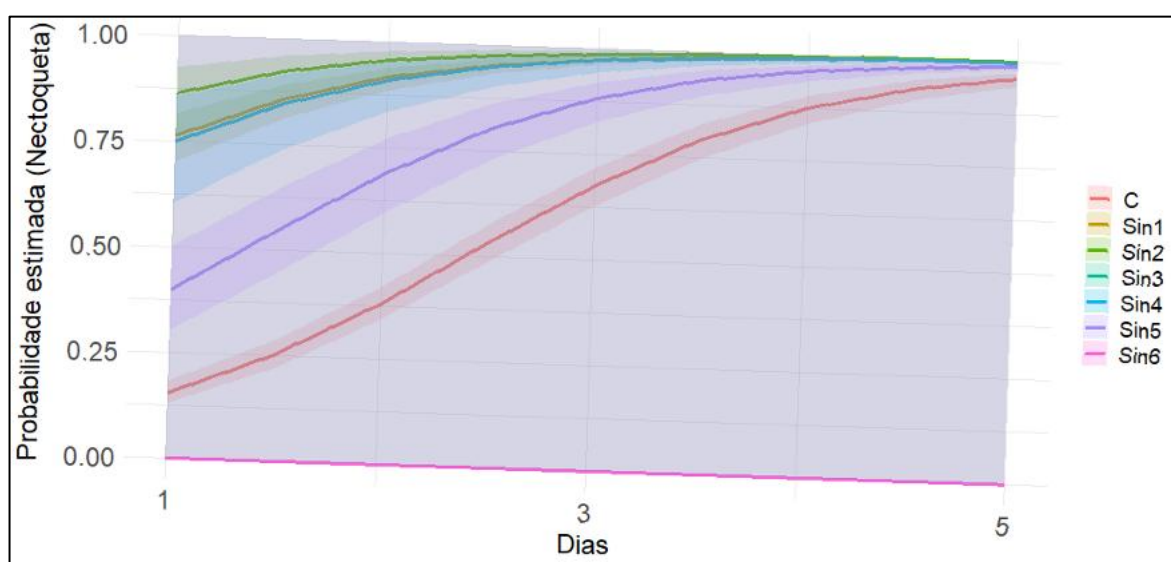


Figura 22: Probabilidade predita de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta ao longo do tempo, com base em modelo binomial com correção de viés. Intervalos sombreados indicam IC 95%. Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

A performance do modelo foi avaliada por meio da curva ROC com área sob a curva (AUC) de 0,901, indicando uma boa precisão dos dados (Figura 23).

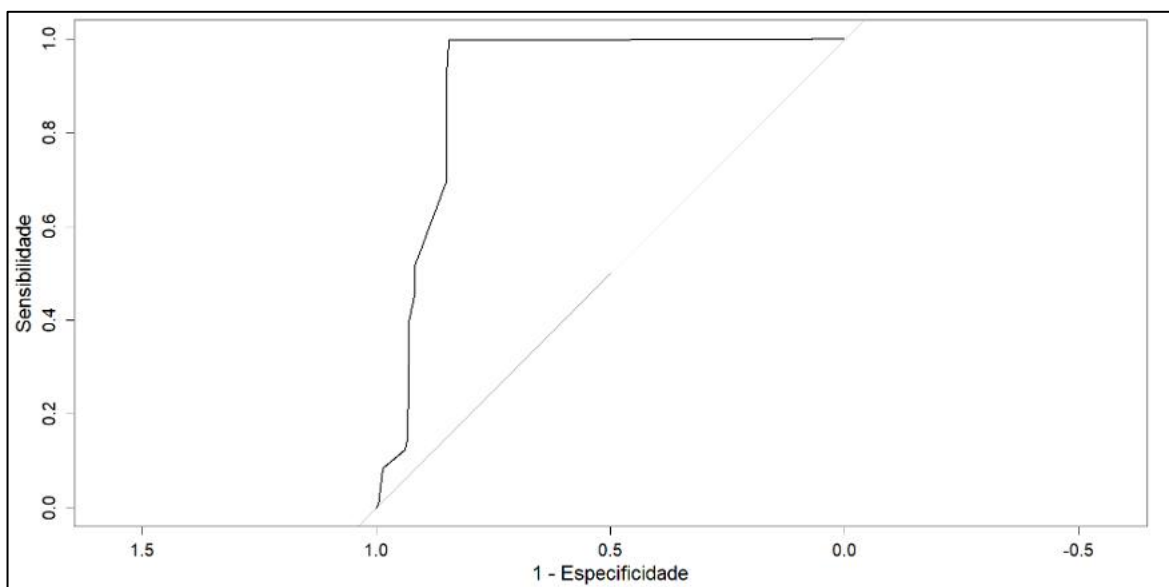


Figura 23: Curva ROC do modelo de regressão logística binária ajustado para estimar a probabilidade de larvas de *P. dumerilii* atingirem o estágio de nectoqueta nos diferentes tratamentos sinérgicos. A área sob a curva (AUC = 0,901) representa a capacidade discriminativa do modelo.

A comparação múltipla entre os tratamentos, ajustada por Tukey, apresentou diferenças significativas entre grupos de tratamentos. Os tratamentos Sin1, Sin2 e Sin4 apresentaram probabilidades estimadas significativamente maiores do que Sin5 e aos tratamentos Sin3 (35°C, 30) e Sin6 (35°C, 25) segundo comparação post-hoc (Figura 24).

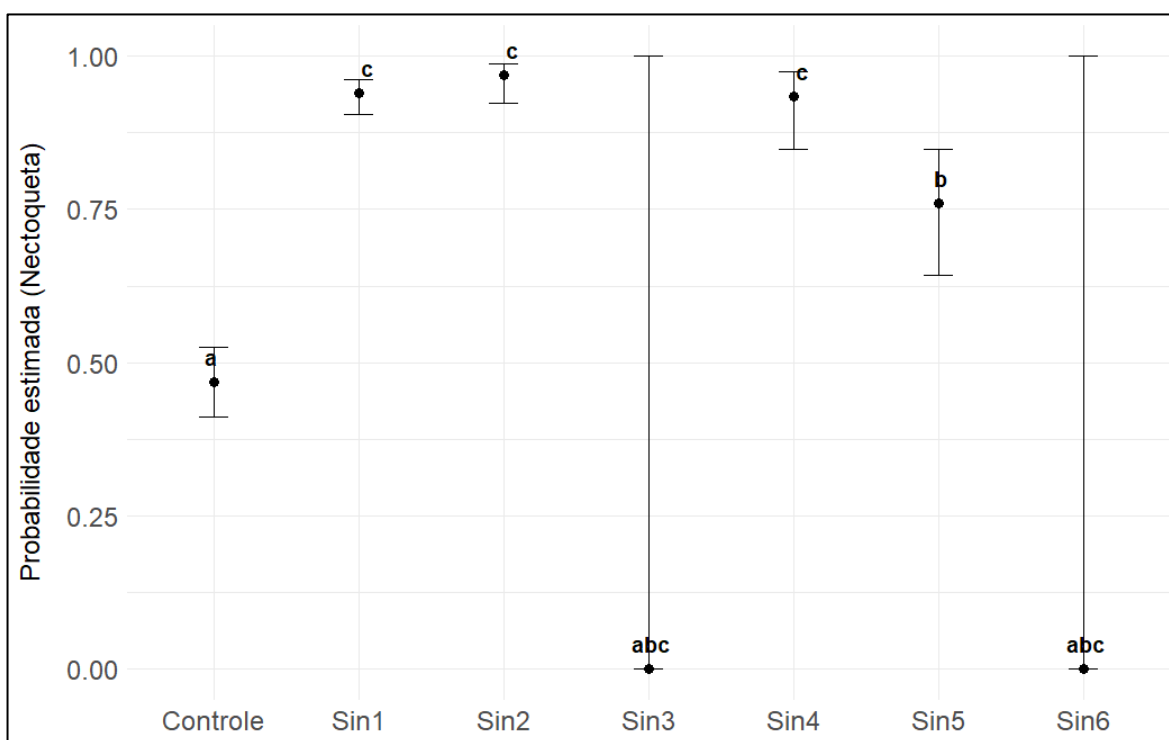


Figura 24: Probabilidade estimada de larvas atingirem o estágio final por tratamento, com IC 95%. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os grupos (teste *post-hoc* de Tukey). Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30 °C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25 °C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Efeito sinérgico na sobrevivência larval de *P. dumerilii*

A análise de regressão logística binária mostrou que os tratamentos tiveram um impacto significativo na sobrevivência das larvas de *Platynereis dumerilii* em condições combinadas de temperatura e salinidade. Dentre os tratamentos, Sin6 (35 °C, 25) apresentou uma diminuição extremamente significativa na probabilidade de sobrevivência, com *odds ratio* de 0,04 (IC 95%: 0,01–0,11; $p < 0,001$), sinalizando uma redução acentuada na probabilidade de sobrevivência das larvas (Figura 25).

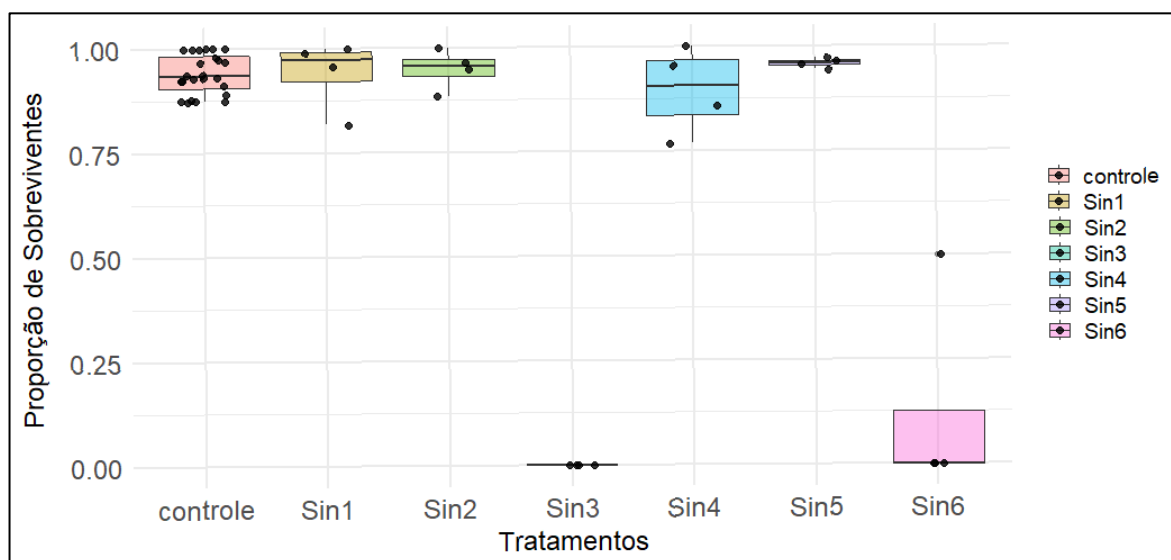


Figura 25: Proporção de larvas vivas por unidade experimental nos diferentes tratamentos sinérgicos. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas correspondem à distribuição dos dados. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Apesar de os tratamentos Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin4 (25°C, 25) e Sin5 (30°C, 25) terem mostrado variações na porcentagem de larvas sobreviventes, essas diferenças não foram estatisticamente relevantes em comparação com o controle ($p > 0,05$).

A análise *post-hoc*, com ajuste de Tukey, não identificou diferenças significativas entre os tratamentos Sin1 (25 °C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin4 (25°C, 25) e Sin5 (30°C, 25) em relação ao controle, corroborando os resultados do modelo. Por outro lado, o tratamento Sin6 diferiu, reforçando o padrão de mortalidade observado e o tratamento Sin3 (35 °C, 30) causou a morte total das larvas, indicando uma condição adversa para a sobrevivência larval (Figura 26).

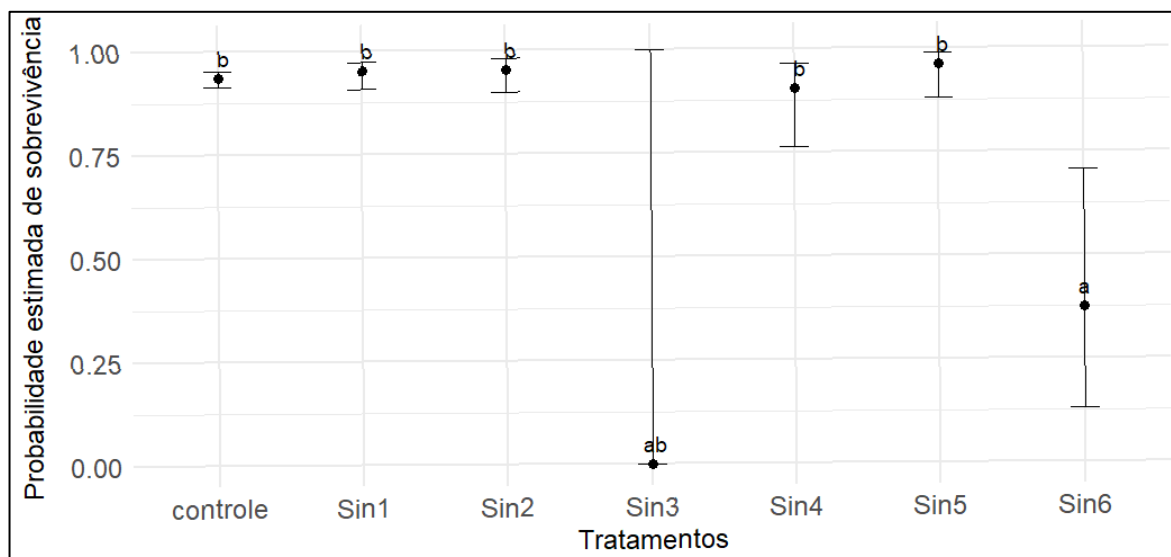


Figura 26: Probabilidade estimada de sobrevivência larval por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes com base em teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Os resultados indicam que temperaturas elevadas, principalmente quando combinadas com baixa salinidade, comprometem a sobrevivência larval de *P. dumerilii*, com mortalidade total a 35 °C.

Efeitos deletérios sinérgico no desenvolvimento larval de *P. dumerilii*

A exposição simultânea das larvas de *Platynereis dumerilii* à salinidade reduzida e à temperatura elevada intensificou o aparecimento das anomalias morfológicas previamente descritas. Foram observadas deformações no corpo, contornos anômalos em metatrocófora e nectoqueta, como formas assimétricas, curvadas, achatadas, abaloadas ou curvo, além de perda da simetria longitudinal e extensão anormal do corpo. Alterações nos parapódios também foram recorrentes, como a ausência unilateral, alargamento e disposição irregular. A redução no número de cerdas e a ausência de olhos foram frequentes em todos os estágios analisados (Tabela 2). A frequência e a severidade das anomalias foram mais elevadas nos tratamentos combinados Sin1 (25 °C, 30) e Sin2 (30 °C, 30), sugerindo um efeito sinérgico entre os estressores ambientais sobre os processos de segmentação e organogênese.

A análise de regressão logística binomial mostrou diferenças notáveis entre os tratamentos. O modelo ajustado revelou que os tratamentos Sin1 (25 °C, 30) e Sin2 (30 °C, 30) diminuíram de forma significativa a probabilidade de desenvolvimento saudável das larvas (OR = 0.29, IC 95%: 0.19–0.45, $p < 0.001$) e (OR = 0.38, IC 95%: 0.23–0.63, $p < 0.001$), respectivamente. O tratamento Sin4 (25 °C, 25) indicou uma tendência de diminuição na proporção de larvas saudáveis (OR = 0.46, IC 95%: 0.20–1.24, $p = 0.086$), apesar de não apresentar significância estatística. O tratamento Sin5 (30 °C + 25) também não apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao controle (OR = 0.64, IC 95%: 0.32–1.43, $p = 0.240$) (Figura 27).

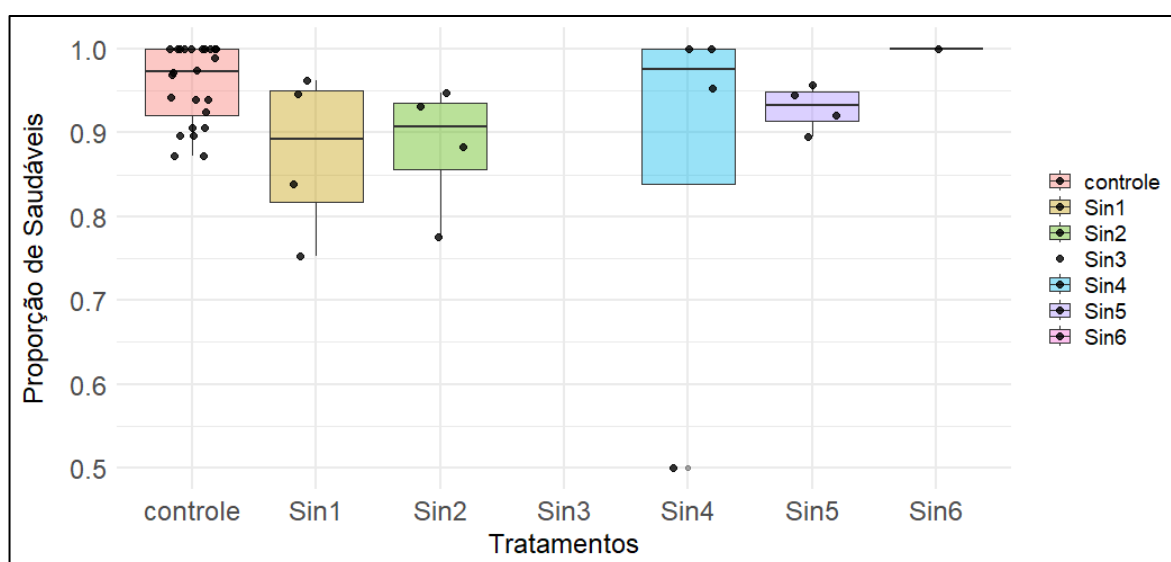


Figura 27: Proporção de larvas sem anomalias por unidade experimental nos diferentes tratamentos sinérgicos. Cada ponto representa um valor observado, e as caixas indicam a distribuição dos dados (boxplot). Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Por outro lado, o tratamento Sin6 (35 °C, 25) apresentou um OR extremamente alto (OR = 2.20×10^6 , IC 95%: $<1e-64$ –NA, $p = 0.993$), porém com alta variância e resultado estatisticamente não significativo, em razão da quantidade de observações de larvas saudáveis ser muito pequena.

As diferenças foram confirmadas pelas comparações *post-hoc* (Tukey), principalmente entre o grupo controle e os tratamentos Sin1 ($p < 0.0001$) e Sin2 ($p = 0.0016$). Tais resultados evidenciam os efeito negativo dessas condições no desenvolvimento

saudável das larvas. As outras comparações não mostraram significância estatística ($p > 0,05$) (Figura 28).

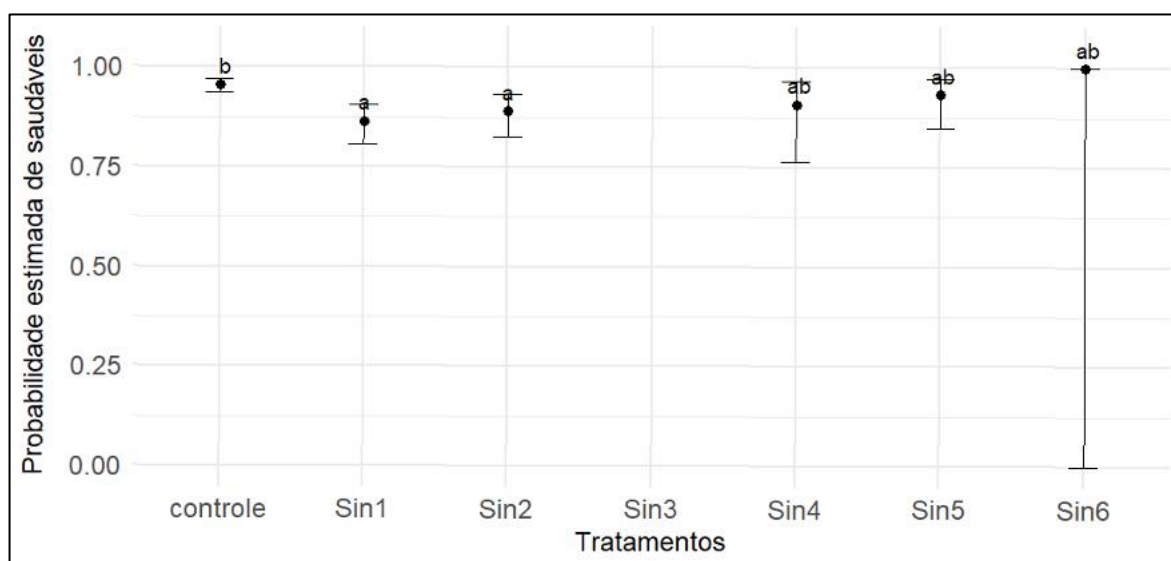


Figura 28: Probabilidade estimada de larvas sem anomalias por tratamento, com médias e IC 95%. Letras indicam tratamentos estatisticamente diferentes segundo teste post-hoc. Tratamentos: Controle (18°C, 35), Sin1 (25°C, 30), Sin2 (30°C, 30), Sin3 (35°C, 30), Sin4 (25°C, 25), Sin5 (30°C, 25) e Sin6 (35°C, 25).

Esses resultados sugerem que a elevação da temperatura quando combinada com salinidade 30 reduz o desenvolvimento saudável das larvas, enquanto outras combinações de estressores não apresentaram efeitos detectáveis nas condições testadas.

5. DISCUSSÃO

As mudanças climáticas, como o aquecimento dos oceanos e a intensificação de eventos de baixa salinidade, têm ampliado as preocupações quanto aos impactos sobre organismos marinhos, especialmente durante as fases iniciais do desenvolvimento, reconhecidamente mais sensíveis. Neste contexto, este estudo avaliou os efeitos isolados e combinados da temperatura e salinidade sobre o desenvolvimento larval de *Platynereis dumerilii*, com ênfase na sobrevivência, no tempo de desenvolvimento e na ocorrência de anomalias morfológicas. Com base em cenários projetados pelo IPCC, os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para compreender como estressores ambientais atuam sobre a ontogenia de espécies bentônicas com larvas lecitotróficas, contribuindo para discutir os mecanismos de tolerância, os limites fisiológicos e as potenciais implicações ecológicas diante das mudanças climáticas.

5.1 Efeitos da salinidade

A exposição das larvas de *Platynereis dumerilii* a diferentes condições de salinidade revelou que, embora a redução para 30 e 25 não tenha comprometido o desenvolvimento até o estágio de nectoqueta, a sobrevivência e a integridade morfológica das larvas foram sensivelmente afetadas sob salinidade 25. Essa resposta sugere que a espécie apresenta certa tolerância fisiológica a variações moderadas de salinidade (30), mas que condições hipossalinas mais acentuadas (≤ 25) podem ultrapassar os limites de plasticidade fenotípica larval.

Efeitos semelhantes de comprometimento sob salinidades reduzidas foram observados para diversas espécies de poliquetas. *Capitella* sp., por exemplo, mesmo sendo adaptado a ambientes estuarinos, apresentou redução na sobrevivência e no desenvolvimento larval e juvenil em salinidades inferiores a 20 (Pechenik *et al.*, 2000). Ushakova & Sarantchova (2004), relataram que larvas trocóforas e nectoquetas de *Nereis (Alitta) virens*, conseguem se desenvolver normalmente em salinidades entre 22 e 34, mas apresentaram efeitos deletérios severos abaixo de 14. Resultados similares foram reportados para *Hediste japônica* e *H. diadroma*, cujas larvas apresentaram desenvolvimento otimizado entre 22,5 e 30, sendo prejudicado em salinidades inferiores (Tosuji & Sato, 2005).

De forma complementar outros estudos reforçam essa ideia. Qiu & Qian (1997), observaram que *Hydroides elegans* apresentou redução acentuada na sobrevivência e no desenvolvimento embrionário em salinidades abaixo de 25, com completa inibição da clivagem a 20 e mortalidade total a 15. Esses padrões são consistentes com os observados para *P. dumerilii* em salinidade 25, indicando que, mesmo entre espécies relativamente tolerantes, há limites fisiológicos definidos que, quando ultrapassados, comprometem não apenas o sucesso ontogenético, mas a viabilidade larval como um todo.

Os efeitos subletais observadas em *P. dumerilii* sob salinidade 25 como perda de simetria, anomalias e ausência de parapódios, refletem prováveis falhas no processo de segmentação e organogênese. Esses são processos altamente dependentes de estabilidade osmótica e homeostase iônica durante o desenvolvimento (Brusca *et al.*, 2022). Semelhanças nas alterações morfológica, principalmente do corpo do poliqueta *Marenzelleria viridis*

foram observadas por Bochert *et al.* (1996), indicando que a morfologia funcional pode ser comprometida pelo estresse salino, ainda quando o desenvolvimento é aparente.

O aumento de mortalidade em salinidade 25 sugere que a manutenção das condições fisiológicas adequadas à sobrevivência, além da dependência da progressão ontogenética, também é um fator crucial para a viabilidade das larvas. O que se torna preocupante no contexto de mudanças climáticas, onde eventos de chuvas extremas e aumento do aporte continental podem desencadear a eventos de diluição em áreas costeiras, especialmente em estuários e regiões tropicais.

5.2 Efeitos da temperatura

A temperatura demonstrou exercer forte influência sobre o desenvolvimento larval de *Platynereis dumerilii*, afetando não apenas a taxa de progressão ontogenética, mas também a sobrevivência e a integridade morfológica das larvas. Estudos anteriores indicam que o aumento da temperatura acelera o desenvolvimento inicial de invertebrados marinhos (Byrne, 2011; Deutsch *et al.*, 2015; Clark *et al.*, 2017; Contins *et al.*, 2025), e os resultados obtidos neste estudo confirmam esse padrão. A aceleração do desenvolvimento larval foi evidente ao longo de todos os tratamentos térmicos, com maior rapidez na transição entre estágios, mesmo em condições não ideais.

Em 25 °C, as larvas apresentaram um melhor desempenho, com altas taxa de progressão ao estágio de nectoqueta, elevada taxa de sobrevivência e baixa frequência de anomalias, indicando um provável ponto de ótimo térmico para o desenvolvimento larval. Esse resultado é similar ao descrito por Broquard *et al.* (2022) para o poliqueta *Arenicola marina* que utilizaram modelos bioenergéticos para descrever a dinâmica de assimilação e alocação de energia ao longo do desenvolvimento da espécie e observaram que, temperaturas intermediárias proporcionam maior eficiência larval.

Entretanto a elevação da temperatura para 30 °C e 32,5 °C, resultaram em aumento significativo de anomalias e tendência de redução na sobrevivência, especialmente em 32,5 °C, ainda que tenha favorecido a progressão do desenvolvimento. Esses efeitos refletem uma condição subótima, em que o metabolismo acelerado não é acompanhado de

estabilidade fisiológica. O impacto é acentuado em 35 °C, onde foi registrada mortalidade total, caracterizando um limiar térmico crítico para a *P. dumerilii*.

A ocorrência de anomalias sob os efeitos térmicos se mostrou evidente a partir de 30 °C, com deformações corporais, assimetrias e perda de estruturas como olhos e parapódios. Efeitos também observados por David & Simon (2014) com os espionídeos *Boccardia proboscidea* e *Polydora hoplura*, em que a aceleração do desenvolvimento larval sob temperaturas elevadas foi acompanhada de comprometimento morfológico e redução na viabilidade. Sánchez-Ovando *et al.* (2023) também relataram aumento da frequência de larvas anômalas e redução na sobrevivência de serpúlideos como *Spirobranchus* sp., sob temperaturas entre 30°C e 34 °C, reforçando o padrão de danos morfogenéticos induzido por estresse térmico em poliquetas.

Além disso, os dados indicam que o tempo exerce um efeito positivo sobre o desenvolvimento, independentemente da temperatura, o que é consistente com as observações de Gray (1976) em *Serpula vermicularis*, cuja resistência térmica aumentou com o avanço ontogenético. No entanto, isso não se mostrou suficiente para compensar os efeitos letais de temperaturas extremas em *P. dumerilii*.

De modo geral, os resultados demonstram que a viabilidade larval de *P. dumerilii* é comprometida acima de 30°C, prejudicando tanto a sobrevivência quanto o desenvolvimento morfológico, e evidencia a vulnerabilidade dessa fase do ciclo de vida a extremos térmicos o que reforça a preocupação com os impactos das mudanças climáticas em ambientes costeiros.

5.3 Efeitos Sinérgicos e Considerações Ecológicas

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a combinação entre temperatura e salinidade exerce efeitos sinérgicos relevantes sobre o desenvolvimento larval de *Platynereis dumerilii*, afetando significativamente a progressão ontogenética, a sobrevivência e a ocorrência de anomalias morfológicas.

Condições intermediárias de aquecimento (25–30 °C) associadas a salinidades de 25–30 promoveram maior proporção de larvas atingindo o estágio de nectoqueta,

sugerindo uma janela de tolerância fisiológica que favorece o desenvolvimento. No entanto, essas mesmas combinações, ocasionaram um aumento na frequência de anomalias morfológicas, como deformações nos parapódios e assimetria corporal, indicando que a aceleração do desenvolvimento pode ocorrer às custas da morfologia regular.

Esse padrão indica que, ainda que haja progressão ontogenética, o sucesso do desenvolvimento pleno, quando em ambientes estressantes, pode ser comprometido, levando a consequências em processos de diferenciação e segmentação. Em contraste com o estudo de Ushakova (2003), no qual larvas de *Spirorbis spirorbis* expostas a condições desfavoráveis de salinidade e temperatura não apresentaram sequer avanço no desenvolvimento.

Comparações com outros poliquetas reforçam a sensibilidade dessa fase larval quando expostos a múltiplos expressores ambientais. Åkesson & Costlow (1978) por exemplo, notou que o poliqueta *Ophryotrocha diadema* teve o crescimento otimizado em salinidades entre 30–35 e temperaturas até 25 °C, demonstrando efeitos positivos de certas combinações ambientais. Enquanto, larvas do poliqueta *Hydroides dirampha* apresentaram maior tolerância ao aquecimento e à redução de salinidade em condições combinadas, com uma maior taxa de crescimento e assentamento larval em salinidade intermediária (26) (Liu *et al.*, 2020). No entanto, a sobrevivência larval em *P. dumerilii* resultou em colapso completo do desenvolvimento quando exposta a 35 °C, corroborando com os achados de Gray (1976), que observou efeitos letais em *Serpula vermicularis* sob interações entre altas temperaturas e baixa salinidade.

Adicionalmente, o aumento da temperatura combinado com salinidade 30 reduziu a proporção de larvas saudáveis em *P. dumerilii*, reforçando a noção de que estressores ambientais atuam de forma sinérgica e não aditiva (Ushakova, 2003). Esses dados indicam que, em *P. dumerilii*, a aceleração do desenvolvimento sob estresse térmico e osmótico pode ocultar falhas mais profundas na organização morfológica, com implicações negativas para o sucesso ecológico pós-larval.

As implicações ecológicas desses resultados são substanciais. Em ambientes costeiros, especialmente estuarinos e tropicais, onde eventos extremos de temperatura e alterações salinas vêm se tornando mais frequentes, tais condições podem afetar diretamente o recrutamento natural de espécies marinhas com desenvolvimento indireto, como *P.*

dumerilii. A redução da sobrevivência e o comprometimento morfogenético observados indicam um risco ecológico concreto, com potenciais efeitos cascata sobre estruturas tróficas bentônicas.

Por fim, esses achados apontam para lacunas importantes na compreensão da tolerância larval a estressores múltiplos, especialmente no contexto de mudanças climáticas. Estudos futuros devem explorar a plasticidade adaptativa dessas respostas, possíveis efeitos transgeracionais e a interação com outros fatores ambientais, como acidificação e disponibilidade alimentar, por exemplo, para entender com maior precisão os limites ecológicos dessas espécies frente às pressões climáticas emergentes.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento larval de *P. dumerilii* foi influenciado por variações de temperatura e salinidade, tanto de maneira isolada quanto sinérgica. Condições moderadamente alteradas (25 °C e 30 °C, salinidade 30), favoreceram o avanço ontogenético até o estágio de nectoqueta, mas também elevaram a incidência de anomalias morfológicas, indicando que o estresse ambiental pode acelerar o desenvolvimento em detrimento da integridade estrutural das larvas, o que pode impactar o recrutamento de juvenis viáveis. Temperaturas extremas (35 °C) e salinidade reduzida (25) resultaram em elevada mortalidade, indicando os limites fisiológicos da espécie.

Os efeitos sinérgicos entre os estressores não foram aditivos, mas complexos e não lineares, reforçando a importância de abordagens multifatoriais em estudos de mudança climática. *P. dumerilii* demonstrou ter plasticidade frente a alterações ambientais moderadas, mas essa capacidade foi superada em cenários mais extremos, compatíveis com os projetados para o aquecimento global.

A espécie mostrou-se um bom modelo para estudos experimentais sobre impactos climáticos em invertebrados marinhos de desenvolvimento indireto. Eventos como ondas de calor e aporte excessivo de água doce podem comprometer o recrutamento e afetar a estrutura das comunidades bentônicas. Futuras pesquisas devem considerar os efeitos transgeracionais e a resposta de estágios juvenis e adultos a esses estressores.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Åkesson, B. & Costlow, J.D. (1978) Effects of temperature and salinity on the life cycle of *Ophryotrocha diadema* (Polychaeta, Dorvilleidae). *Ophelia*, 17(2), 215–229. <https://doi.org/10.1080/00785326.1978.10425485>
- Amaral, A.C.Z. & Migotto, A.E. (1980) Importância dos anelídeos poliquetas na alimentação da macrofauna demersal e epibentônica da região de Ubatuba. *Boletim do Instituto Oceanográfico, São Paulo* 29(2), 31–35. <https://doi.org/10.1590/S0373-55241980000200006>
- Bochert, R. (1997) *Marenzelleria viridis* (Polychaeta: Spionidae): a review of its reproduction. *Aquatic Ecology* 31, 163–175. <https://doi.org/10.1023/A:1009951404343>
- Brierley, A.S. & Kingsford, M.J. (2009) Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current Biology*, 19, R602–R614. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.046>
- Broquard, C., Lancelot, T., Lefebvre, S., Courcot, L. & Gaudron, S.M. (2022) Larval growth of the polychaete *Arenicola marina* under different temperature and food conditions: consequences on bioenergetic models. *Conservation Physiology* 10(1), coac033. <https://doi.org/10.1093/conphys/coac033>
- Brusca, R.C., Moore, W. & Shuster, S.M. (2018) *Invertebrados*. 3rd ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 649–726.
- Brusca, R.C., Moore, W. & Shuster, S.M. (2022) *Invertebrates*. 4th ed. Oxford University Press, Oxford.
- Byrne, M. (2011) Impact of ocean warming and ocean acidification on marine invertebrate life history stages: Vulnerabilities and potential for persistence in a changing ocean. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 49, 1–42. <https://doi.org/10.1201/b11009-2>
- Cameron, H., Gáspár, J. and Williams, E.A. (2024). Microalgal biofilm induces larval settlement in the model marine worm *Platynereis dumerilii*. *Royal Society Open Science*, 11240274. <http://doi.org/10.1098/rsos.240274>
- Campbell, A.L., Mangan, S., Ellis, R.P. & Lewis, C. (2014). Ocean acidification increases copper toxicity to the early life history stages of the polychaete *Arenicola marina* in artificial seawater. *Environmental science & technology*, 48(16), 9745–9753. <https://doi.org/10.1021/es502739m>
- Capa, M. & Hutchings, P. (2021) Annelid diversity: historical overview and future perspectives. *Diversity*, 13, 129. <https://doi.org/10.3390/d13030129>
- Clark, M.S., Sommer, U., Sihra, J.K., Thorne, M.A., Morley, S.A., King, M., Viant, M.R. & Peck, L.S. (2017) Biodiversity in marine invertebrate responses to acute warming revealed by a comparative multiomics approach. *Global Change Biology*, 23, 318–330. <https://doi.org/10.1111/gcb.13357>
- Contins, M., Barroso, R., Paiva, P.C. & Ventura, C.R. (2023) Assessing the vulnerability of endangered and endemic brooding sea urchin *Cassidulus mitis* in response to climate change: Impacts on larvae and settlers in the southwestern Atlantic. *Marine Environmental Research*, 192, 106186. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106186>

- Contins, M., Barroso, R., Paiva, P.C. & Ventura, C.R. (2025) Effects of climate change: Temperature and salinity impacts on the early development of the sea star *Echinaster (Othilia) brasiliensis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 589, 152110. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2025.152110>
- David, A.A. & Simon, C.A. (2014) The effect of temperature on larval development of two non-indigenous poecilognous polychaetes (Annelida: Spionidae). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 461, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.07.012>
- Dean, H.K. (2008) The use of polychaetes (Annelida) as indicator species of marine pollution: a review. *Revista de Biologia Tropical* 56(4), 11–38. <https://doi.org/10.15517/rbt.v56i4.27162>
- Deutsch, C., Ferrel, A., Seibel, B., Pörtner, H.-O. & Huey, R.B. (2015) Climate change tightens a metabolic constraint on marine habitats. *Science* 348, 1132–1135. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1605>
- Domingues, C.M., Church, J.A., White, N.J., Gleckler, P.J., Wijffels, S.E., Barker, P.M. & Dunn, J.R. (2008) Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* 453(7198), 1090–1093. <https://doi.org/10.1038/nature07080>
- Dorresteyn, A.W.C. (1990) Quantitative analysis of cellular differentiation during early embryogenesis of *Platynereis dumerilii*. *Roux's Archives of Developmental Biology* 199, 14–30. <https://doi.org/10.1007/BF01681530>
- Fischer, A. & Dorresteyn, A. (2004) The polychaete *Platynereis dumerilii* (Annelida): a laboratory animal with spiralian cleavage, lifelong segment proliferation and a mixed benthic/pelagic life cycle. *BioEssays* 26(3), 314–325. <https://doi.org/10.1002/bies.10409>
- Fischer, A.H.L., Henrich, T. & Arendt, D. (2010) The normal development of *Platynereis dumerilii* (Nereididae, Annelida). *Frontiers in Zoology* 7, 31. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-7-31>
- Fenaux, L. & Pedrotti, M.L. (1988) Metamorphose des larves d'Echinides en pleine eau. *Marine Ecology* 9(2), 93–107. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1988.tb00201.x>
- Filonchik, M., Peterson, M.P., Zhang, L., Hurynovich, V. & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, 173359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
- Gambi, M.C., Zupo, V., Buia, M.C. & Mazzella, L. (2000). Feeding ecology of *Platynereis dumerilii* (Audouin & Milne-edwards) in the seagrass *Posidonia oceanica* system: The role of the epiphytic flora (Polychaeta, Nereididae). *Ophelia*, 53(3), 189–202. <https://doi.org/10.1080/00785326.2000.10409449>
- Gray, J. S. (1976). The effects of salinity, temperature and mercury on mortality of the trocophore larvae of *Serpula vermicularis* L. (Annelida: Polychaeta). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 23(2), 127–134. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(76\)90136-2](https://doi.org/10.1016/0022-0981(76)90136-2)
- Hardege, J.D. (1999). Nereidid polychaetes as model organisms for marine chemical ecology. *Hydrobiologia*, 402, 145–161. <https://doi.org/10.1023/A:1003740509104>
- Harvey, B.P., Al-Janabi, B., Broszeit, S., Cioffi R., Kumar, A., Aranguren-Gassis, M., Bailey A., Green, L., Gsottbauer, C.M., Hall E.F., Lechler M.L., Mancuso F.P., Pereira C.O., Ricevuto, E., Schram, J.B., Stapp, L.S., Stenberg, S. & Santa Rosa, L.T. (2014)

- Evolution of marine organisms under climate change at different levels of biological organisation. *Water*, 6(11), 3545–3574. <https://doi.org/10.3390/w6113545>
- Helm, K.P, Bindoff, N.L. & Church, J.A. (2010). Changes in the global hydrological-cycle inferred from ocean salinity. *Geophysical Research Letters*. 37(18). <https://doi.org/10.1029/2010GL044222>
- Hoegh-Guldberg, O. & Pearse, J.S. (1995). Temperature, food availability, and the development of marine invertebrate larvae. *American Zoologist*, 35(4), 415–425. <https://doi.org/10.1093/icb/35.4.415>
- Hutchinson, T.H, Jha, A.N. & Dixon, D.R. (1995). The Polychaete *Platynereis dumerilii* (Audouin and Milne-Edwards): A New Species for Assessing the Hazardous Potential of Chemicals in the Marine Environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 31, 271–281. <https://doi.org/10.1006/eesa.1995.1074>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Geneva: IPCC.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jackson, G.A. & Strathmann, R.R. (1981). Larval mortality from offshore mixing as a link between precompetent and competent periods of development. *The American Naturalist*, 118 (1),16–26. <https://doi.org/10.1086/283797>
- Jarrold, M.D., Chakravarti, L.J., Gibbin, E.M., Christen, F., Massamba-N'Siala, G., Blier, P.U. & Calosi, P. (2019). Life-history trade-offs and limitations associated with phenotypic adaptation under future ocean warming and elevated salinity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374(1768), 20180428. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0428>
- Jonsson, F.A. (2014). The industrial revolution in the anthropocene. *The Journal of Modern History*, 84 (3): 679–696. <https://doi.org/10.1086/666049>
- Kuehn, E., Stockinger, A.W., Girard, J., Raible, F. & Özpolat, B.D. (2019). A scalable culturing system for the marine annelid *Platynereis dumerilii*. *PLoS One*, 1(12): e0226156. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226156>
- Kupriyanova, E.K. & Havenhand, J.N. (2005). Effects of temperature on sperm swimming behaviour, respiration and fertilization success in the serpulid polychaete, *Galeolaria caespitosa* (Annelida: Serpulidae). *Invertebrate Reproduction & Development*, 48(1-3), 7-17. <https://doi.org/10.1080/07924259.2005.9652166>
- Ledley, T.S., Sundquis, E.T., Schwartz, S.E., Hall, D.K., Fellows, J.D., & Killeen, T.L. (1999). Climate change and greenhouse gases, *Eos Transactions American Geophysical Union*, 80(39), 453–458. <https://doi.org/10.1029/99EO00325>
- Liu, T.X., Kinn-Gurzo, S. & Chan, K.Y.K. (2020). Resilience of invasive tubeworm (*Hydroides dirampha*) to warming and salinity stress and its implications for biofouling community dynamics. *Marine Biology*, 167 (10), 145. <https://doi.org/10.1007/s00227-020-03758-y>
- Lyster, I.H.J. (1965). The salinity tolerance of polychaete larvae. *The Journal of Animal Ecology*, 517-527. <https://doi.org/10.2307/2446>

- O'Connor, M.I., Bruno, J.F., Gaines, S.D., Halpern, B.S., Lester, S.E., Kinlan, B.P., Weiss, J.M. (2007). Temperature control of larval dispersal and the implications for marine ecology, evolution, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(4), 1266–1271. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603422104>
- Özpolat, B.D., Randel, N., Williams, E.A., Bezares-Calderón, L.A., Andreatta, G., Balavoine, G., Bertucci, P.Y., Ferrier, D.E.K., Gambi, M.C., Gazave, E., Handberg-Thotsager, M., Hardege, J., Hird, C., Hsieh, Y.W., Hui, J., Mutemi, K.M., Schneider S.Q., Simakov, O., Vergara, H.M., Vervoort, M., Jékely, G., Tessmar-Raible K., Raible, F. & Arendt, D. (2021). The Nereid on the rise: *Platynereis* as a model system. *EvoDevo*, 12, 10. <https://doi.org/10.1186/s13227-021-00180-3>
- Pechenik, J.A. (1999). On the advantages and disadvantages of larval stages in benthic marine invertebrate life cycles. *Marine Ecology Progress Series* 177, 269–297. <https://doi.org/10.3354/meps>
- Pörtner, H.O. (2010). Oxygen- and capacity-limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate related stressor effects in marine ecosystems. *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 881–893. <https://doi.org/10.1242/jeb.037523>
- Przeslawski, R., Davis, A.R. & Benkendorff K. (2005). Synergistic effects associated with climate change and the development of rocky shore molluscs. *Global Change Biology*, 11, (3), 515–522. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00918.x>
- Qiu, J.W. & Qian, P.Y. (1997). Combined effects of salinity, temperature and food on early development of the polychaete *Hydroides elegans*. *Marine Ecology Progress Series*, 152, 79–88. <https://doi.org/10.3354/meps>
- Quinn, B. K. (2017). Threshold temperatures for performance and survival of American lobster larvae: A review of current knowledge and implications to modeling impacts of climate change. *Fisheries Research*, 186, 383–396. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.09.022>
- Randall, J. E. (1967). Food habits of reef fishes of the West Indies. *Studies in Tropical Oceanography*, 5, 665–847.
- Ribeiro, R.P., Null, R.W., & Özpolat, B.D. (2025). Sex-biased gene expression precedes sexual dimorphism in the agonadal annelid *Platynereis dumerilii*. *Development*, 152(7), dev204513. <https://doi.org/10.1242/dev.204513>
- Rouse, G.W. & Pleijel, F. (2001). Polychaetes anatomy. In: Polychaetes (Eds). Oxford University Press, Nova Iorque. 18–33.
- Rouse, G.W. & Pleijel, F. (2006). *Reproductive biology and phylogeny of Annelida*. Vol. 4. Science Publishers. Nova Hampshire, 698pp.
- Sánchez-Ovando, J.P., Benítez-Villalobos, F. & Bastida-Zavala, J.R. (2023). Elevated temperatures increase abnormalities in embryos and reduce larval survival in serpulid polychaetes. *Biology Open*, 12 (9), bio060053. <https://doi.org/10.1242/bio.060053>
- Santi, L. & Tavares, M. (2009). Polychaeta assemblage of an impacted estuary, Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brasil. *Brazilian Journal of Oceanography*. 57(4): 287–303. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592009000400004>
- Schäfer, S., Gueroun, S.K., Andrade, C. & Canning-Clode, J. (2021). Combined effects of temperature and salinity on polyps and ephyrae of *Aurelia solida* (Cnidaria: Scyphozoa). *Diversity*, 13(11), 573. <https://doi.org/10.3390/d13110573>

- Schmitt, R.W. (2008). Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21(1), 12–19. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2008.63>
- Soares-Gomes, A., Mendes, C.L.T., Tavares, M. & Santi, L. (2012). Taxonomic sufficiency of polychaete taxocenes for estuary monitoring. *Ecological Indicators*, 15(1), 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.030>
- Song, S., Starunov, V., Bailly, X., Ruta, C., Kerner, P., Cornelissen, A. J. & Balavoine, G. (2020). Globins in the marine annelid *Platynereis dumerilii* shed new light on hemoglobin evolution in bilaterians. *BMC Evolutionary Biology*, 20, 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12862-020-01714-4>
- Stockinger, A.W., Adelman, L., Fahrenberger, M. Ruta, C., Özpolat, B.D., Nadja, M., Balavoine, G & Raible, F. (2024). Molecular profiles, sources and lineage restrictions of stem cells in an annelid regeneration model. *Nature Communications*, 15, 9882. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54041-3>
- Surugiu, V. (2005). The use of polychaetes as indicators of eutrophication and organic enrichment of coastal waters: A study case—Romanian Black Sea coast. *Analele Științifice ale Universității “Al.I. Cuza” Iași, s. Biologie animală*, 51, 55–62.
- Tosuji, H. & Sato, M. (2006). Salinity favorable for early development and gamete compatibility in two sympatric estuarine species of the genus *Hediste* (Polychaeta: Nereididae) in the Ariake Sea, Japan. *Marine Biology*, 148, 529–539. <https://doi.org/10.1007/s00227-005-0079->
- Ushakova, O. O. 2003. Combined effect of salinity and temperature on *Spirorbis spirorbis* L. and *Circeus spirillum* L. larvae from the White Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 296(1), 23–33. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(03\)00301-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(03)00301-0)
- Ushakova, O.O. & Sarantchova, O.L. (2004). The influence of salinity on fertilization and larval development of *Nereis virens* (Polychaeta, Nereidae) from the White Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 301, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.09.025>
- Wang, Y.J. (2014). The future of marine invertebrates in face of global climate change. *Journal of Coast Development*, 17(1), e105. <https://doi.org/10.4172/1410-5217.1000e105>
- Weigert, A. & Bleidorn, C. (2016). Current status of annelid phylogeny. *Organisms Diversity & Evolution*, 16, 345–362. <https://doi.org/10.1007/s13127-016-0265-7>
- Wulf, P.O., Häfker, N.S., Hofmann, K., & Tessmar-Raible, K. (2025). Guiding light: Mechanisms and adjustments of environmental light interpretation with insights from *Platynereis dumerilii* and other selected examples. *Zoological Science*, 42 (1). <https://doi.org/10.2108/zs240099>
- Zhang, Z.Q. (2013). Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness. *Zootaxa*, 3703 (1), 1–82. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3703.1.2>
- Zhan, Y., Hu, W., Zhang, W., Liu, M., Duan, L., Huang, X., Chang, Y. & Li, C. (2016). The impact of CO₂-driven ocean acidification on early development and calcification in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Marine Pollution Bulletin* 112 (1–2), 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.003>