



# **RELATÓRIO FINAL**

## **PROJETO MUSSEL UP**

Afonso Moura  
Afonso Ribeiro  
Gabriel Mantovani  
Ricardo Ribeiro  
Sara Silva



**M.U.S.S.E.L. U.P.**

# *Marine Unmanned Surface System for Environmental Logging & Underwater Protection*

## Índice

1. RESUMO.....	3
2. INTRODUÇÃO .....	4
3. METODOLOGIA .....	6
3.1 MATERIAIS .....	6
3.1.1 Componentes do sistema .....	6
3.1.2 Materiais e Ferramentas para Construção do Casco .....	7
3.1.3 Materiais para a Experiência Laboratorial .....	7
3.2 Procedimentos .....	8
3.2.1 Experiência Laboratorial .....	8
3.2.2 Construção da Embarcação .....	10
3.2.3 Desenvolvimento do Software .....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	12
4.1 Comportamento Basal — Grupo Controlo .....	12
4.2 Resposta Comportamental a Contaminantes .....	13
4.2.1 Exposição a Microplásticos.....	13
4.2.2 Exposição a Mercúrio .....	13
4.3 Teste da Embarcação Autónoma .....	13
5. CONCLUSÃO .....	15
6. AGRADECIMENTOS.....	16
7. BIBLIOGRAFIA .....	17

# 1. RESUMO

O projeto **Mussel Up** consiste no desenvolvimento do protótipo de uma embarcação autónoma e sustentável para monitorizar a qualidade da água do oceano. O sistema combina energia renovável, sensores magnéticos, automação e inteligência artificial para detetar a contaminação em tempo real.

A avaliação ambiental baseia-se no comportamento dos mexilhões *Mytilus galloprovincialis*, cuja abertura das conchas é monitorizada através de ímanes e sensores magnéticos. Um software dedicado interpreta estes dados para detetar alterações na qualidade da água e a sua posterior interpretação permite calcular o **Índice de Stress Comportamental (ISC)**, um indicador de impacto biológico em tempo real. A embarcação navega de forma autónoma por *waypoints* GPS. caso sejam detetadas condições perigosas para os mexilhões, o veículo muda automaticamente de rota. Toda a informação recolhida é enviada em tempo real para uma *groundstation* (estação de controlo terrestre).

Para otimizar a realização do projeto, a equipa foi dividida em quatro áreas de trabalho, que se interligavam: a primeira área efetuou uma experiência com os mexilhões e a posterior análise dos dados; a segunda centrou-se na programação do software e o desenvolvimento do sistema eletrónico, no que toca à navegação do barco e à recolha de valores na experiência laboratorial; a terceira permitiu a idealização do casco do barco e a sua posterior construção; por fim, a quarta área trabalhou na divulgação do projeto nas redes sociais, *newsletter*, apresentações à comunidade escolar.

O projeto combina sustentabilidade, biotecnologia e automação, contribuindo para a proteção dos ecossistemas marinhos. Deste modo, o Mussel Up visa contribuir para a diminuição da poluição no oceano, através de conhecimentos das áreas da engenharia, física e biologia.

## 2. INTRODUÇÃO

A proteção e monitorização do oceano é um dos pilares da sustentabilidade e inegociável quando se fala de desenvolvimento sustentável. Em Portugal, segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, a análise de águas tem evoluído positivamente tanto em quantidade como em qualidade, porém mesmo assim assistimos a uma ineficácia dos métodos de controlo atuais. Atualmente, analisar os poluentes na água depende de recolhas manuais e pontuais e também de análises laboratoriais, que demoram entre 24 a 72 horas. Assim, dados em tempo real são escassos e de difícil acesso, criando uma lacuna crítica na capacidade de resposta a eventos de contaminação aguda.

Com uma costa portuguesa de 943km, a automação dos métodos de análise é essencial para garantir a qualidade do nosso oceano. A recolha manual de amostras não é escalável para cobrir continuamente zonas balneares, habitats marinhos e áreas de aquacultura. Contaminantes como chumbo, cádmio, mercúrio e microplásticos - altamente tóxicos para organismos marinhos e para a saúde humana através da cadeia alimentar - não dispõem hoje de sensores de campo acessíveis e em tempo real.

Perante este cenário, a biotecnologia apresenta-se como uma solução complementar e promissora. Nas últimas décadas, os bivalves têm vindo a ser amplamente estudados como biossensores naturais para a monitorização da qualidade da água. Estes moluscos são organismos filtradores sensíveis a alterações químicas no ambiente, conhecidos por fecharem as suas conchas quando a qualidade da água está comprometida - comportamento detetado por sensores magnéticos fixados às conchas. A implementação de valvómetros de alta frequência não invasivos permite já a deteção precoce de eventos de poluição em tempo real, estando esta tecnologia implementada em vários países da União Europeia.

A espécie *Mytilus galloprovincialis*, presente nas costas portuguesas, revela-se particularmente adequada para este fim: processa até 4 litros de água por hora, filtrando continuamente o que nela existe, e fecha as valvas de forma mensurável em resposta a metais pesados, microplásticos e outros contaminantes, mesmo em concentrações subletais. Kelleghan et al. (2023) documentaram que mexilhões expostos a cádmio passam 45,3% do tempo fechados, face a ~15% em controlos — diferença altamente significativa. A biomonitorização tem-se revelado eficaz na deteção precoce de alterações ecológicas súbitas, com transmissão de dados em tempo real.

É neste enquadramento que surge o projeto Mussel Up: uma embarcação autónoma e sustentável que combina a sensibilidade natural dos mexilhões com automação, inteligência artificial e energias renováveis. O objetivo de monitorizar continuamente a qualidade da água e contribuir para a proteção dos ecossistemas marinhos portugueses.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Componentes do sistema

A tabela seguinte lista todos os componentes eletrónicos do sistema, com função, estado e preço estimado.

Componente / Modelo	Função no Sistema	Preço est.
<b>ESP32-WROOM-32</b>	Microcontrolador principal (WiFi, BT, 240 MHz, 3.3 V)	4 €
<b>GPS Neo-6M</b>	Posicionamento para navegação por <i>waypoints</i> (~2,5 m)	5 €
<b>LoRa RFM96W-433 MHz</b>	Comunicação de longo alcance com a <i>groundstation</i> (>1 km)	6 €
<b>4x Sensores Hall 49e</b>	Medição da abertura das conchas dos mexilhões	2 € / un
<b>Regulador AMS1117-3.3 V</b>	Alimentação estável do ESP32 a partir da bateria LiPo	1 €
<b>Bateria LiPo 1S 3,7 V / 1000 mAh</b>	Fonte de energia principal do sistema	10 €
<b>Controlador MPPT CN3791</b>	Carregamento solar da bateria com gestão eficiente (1 A)	3 €
<b>Motor <i>Brushless</i> SL2862 1500KV</b>	Propulsão principal — motor barco RC de alta eficiência	35 €
<b>L298N Dupla Ponte H</b>	<i>musse!</i> DC (alternativo ao ESC; usado nos testes iniciais)	13 €
<b>Servo SG90 / MG90S</b>	Atuação do leme	8 €
<b>8x Painel fotovoltaico 5 V / ~1 W</b>	Recarga solar durante a missão (80x60 mm, monocristalino)	8 € / un
<b>3x Ímanes neodímio N52</b>	Colados nas conchas — campo detetado pelos sensores Hall	5 €

Componente / Modelo	Função no Sistema	Preço est.
<b>Antena SMA 433 MHz</b>	Melhora alcance do LoRa; passa pelo <i>deck</i> via conector SMA	6 €
<b>Cabos Jumper Dupont</b>	Fios que ligam os componentes nas placas de ensaio	5€
<b>2x Placa de ensaio (<i>Breadboard</i>)</b>	Suporte das ligações entre os componentes	6€

### 3.1.2 Materiais e Ferramentas para Construção do Casco

A embarcação foi construída manualmente pela equipa com materiais de baixo custo e fácil acesso, privilegiando contraplacado marinho (resistente à humidade) como material estrutural principal

Material / Ferramenta	Uso na Construção	Custo est.
<b>Contraplacado marinho 5 mm</b>	Painéis do casco (fundo, lados, <i>deck</i> );	~100 €
<b>Selante adesivo de polímero híbrido (<i>MS Polymer / tecnologia SMX</i>).</b>	Colagem estrutural das juntas do casco; resistente à água e ao sal	8 € / un
<b>Serra de recortes</b>	Corte dos painéis de contraplacado por formas e encaixes	-
<b>lixa manual grano 120</b>	Acabamento das superfícies e aderência antes de aplicar cola	-
<b>Berberquim</b>	Furos para a passagem de fios	-

### 3.1.3 Materiais para a Experiência Laboratorial

- Aquários de 20L (×3): grupo controlo, grupo microplásticos, grupo mercúrio
- *Mytilus galloprovincialis* (≥18 indivíduos de ~7 cm), recolhidos do viveiro
- Ímanes de neodímio N52
- Cola epóxi marinho bicomponente
- Microplásticos (partículas polietileno/polipropileno, granulometria < 1 mm)
- Solução de cloreto de mercúrio (HgCl<sub>2</sub>) em concentração subletal
- Espectrofotómetro

- Computador com software de registo de dados
- Arduíno Uno

## 3.2 Procedimentos

### 3.2.1 Experiência Laboratorial

#### Configuração dos grupos experimentais.

A experiência foi estruturada em três grupos independentes a operar em simultâneo:

Grupo	Condição da Água
Aquário 1 - Controlo	Água do mar natural, sem aditivos
Aquário 2 - Microplásticos	Água do mar + partículas de microplástico (PE/PP, < 1 mm)
Aquário 3 - Mercúrio	Água do mar + solução de HgCl <sub>2</sub> em concentração subletal

#### Aclimatização e instrumentação dos mexilhões

Os mexilhões foram recolhidos em ambiente natural e colocados em aclimação em água do mar durante pelo menos 24 horas antes de qualquer intervenção.

Ao longo de um período de aproximadamente dois meses, foram recolhidos registos de salinidade da água nos aquários de teste. Estes dados providenciam contexto ambiental essencial para a interpretação do comportamento dos mexilhões, uma vez que nos ajudou a concluir que as variações de salinidade não seriam um fator determinante na variação da abertura dos bivalves independentemente de contaminação química.

Selecionaram-se apenas os indivíduos com um tamanho médio (7cm) e que abriam espontaneamente as conchas - indicador de boa condição fisiológica. Em cada mexilhão foi fixado um íman de neodímio N52 na concha inferior, com epoxi marinho; o sensor Hall correspondente foi posicionado na concha oposta, com a face sensível orientada diretamente para o íman.

#### Princípio de medição

O sensor Hall deteta a intensidade do campo magnético gerado pelo íman. Quando o mexilhão abre as conchas, a distância sensor-íman aumenta, o campo magnético

detetado diminui e a tensão de saída cai proporcionalmente. O Arduino uno lê esta tensão continuamente e converte-a em ângulo de abertura (graus) com base na curva de calibração individual de cada animal.

### Sequência experimental.

- **Fase inicial:** registo do comportamento basal de todos os mexilhões em água do mar limpa, definindo os valores de referência individuais do ISC.
- **Fase de exposição:** introdução dos contaminantes nos aquários 2 (microplásticos) e 3 (HgCl<sub>2</sub>) com registo contínuo do comportamento.

### Cálculo do Índice de Stress Comportamental (ISC).

O ISC é o indicador central do sistema — não é uma concentração química, mas um índice de impacto biológico. É calculado a cada ciclo de leitura (2 s) a partir de dois componentes combinados por soma ponderada:

$$ISC = \left[ 0,70 \times \frac{\bar{a}_t}{\bar{a}_0} + 0,30 (1 - f_c) \right] \times 100$$

#### Onde:

- $\bar{a}_t$  = ângulo médio atual de abertura do grupo (graus)
- $\bar{a}_0$  = ângulo médio basal em água limpa (linha de referência individual de cada mexilhão)
- $f_c$  = fração de mexilhões completamente fechados na janela móvel dos últimos 10 minutos (0 a 1)
- No caso de  $(\bar{a}_t / \bar{a}_0)$  ser maior que 1, o valor considerado é 1

**Correções aplicadas ao valor basal  $\bar{a}_0$ :** como os mexilhões fecham naturalmente mais em temperaturas extremas (< 10 °C ou > 22 °C), o  $\bar{a}_0$  é ajustado para evitar falsos positivos — sem esta correção, um dia de frio intenso poderia ser interpretado como contaminação.

A tabela seguinte resume os níveis de alerta do ISC e as ações correspondentes do sistema:

ISC	Categoria	Significado Biológico	Ação do Sistema
80 – 100	Sem stress	Comportamento normal	Monitorização de rotina
60 – 79	Stress ligeiro	Leve alteração face ao tabelado	Aumento de frequência de registo

ISC	Categoria	Significado Biológico	Ação do Sistema
40 – 59	<b>Stress moderado</b>	Redução significativa de abertura	Alerta amarelo — marcar localização GPS
20 – 39	<b>Stress elevado</b>	Mexilhões maioritariamente fechados	Alerta vermelho — notificação imediata
0 – 19	<b>Stress crítico</b>	Fecho total e prolongado	MODO EVASÃO — fuga a velocidade máxima

### 3.2.2 Construção da Embarcação

De início houve a idealização da embarcação, seguido do desenvolvimento de uma conceção do casco onde se definiu a forma e as dimensões necessárias para garantir flutuabilidade e estabilidade, tendo em conta o peso dos componentes a transportar.

Optou-se pelo uso de contraplacado, um material de madeira fina, leve e de fácil manipulação, que nos permitiu construir um protótipo resistente e de baixo custo. Após a montagem da estrutura, assegurada por um selante adesivo de polímero híbrido (*MS Polymer*) resistente à água, flexível e adequado para ambientes húmidos, toda a superfície foi impermeabilizada com uma membrana líquida impermeabilizante à base de polímero híbrido SMX® (*Silyl Modified Polymer, SMP*) de modo a impedir a infiltração de água e a assegurar a durabilidade do casco em ambiente aquático. O painel fotovoltaico que garante o fornecimento de energia à embarcação foi instalado no *deck* superior, ligado ao controlador MPPT CN3791 que gere o carregamento da bateria LiPo. A idealização do projeto apresenta uma PCB central que integra o ESP32, o GPS Neo-6M, o módulo LoRa e os três sensores Hall, centralizando toda a lógica de controlo. Na construção física, foi utilizado um sistema de duas placas de ensaio (*breadboard*) para interligar todos os componentes.

O sistema de propulsão utiliza um motor SL2862 controlado por uma ponte H L298N, com sinal PWM gerado pelo ESP32. O leme teorizado seria acionado por um micro-servo SG90, que permitiria o deslocamento lateral da embarcação.

Esta foi construída e testada em ambiente aquático, confirmando flutuação estável, propulsão funcional e capacidade de deslocamento autónomo.



### 3.2.3 Desenvolvimento do Software

O sistema de software foi desenvolvido em três camadas integradas:

- **Firmware integrado (ESP32):** lê os sensores Hall a cada 2 segundos, calcula o ângulo de abertura e o ISC médio e com base nos valores obtidos o sistema decide o modo de condução. Todos estes dados são transmitidos em tempo real para uma *groundstation* a partir de um módulo LoRa;
- **Servidor Python (Flask + API REST):** recebe a telemetria, expõe *endpoints* de dados e comandos, e mantém o histórico georreferenciado de posições e eventos de contaminação;
- **Dashboard web (HTML / Leaflet.js):** interface de monitorização em tempo real com mapa de rota, histórico de leituras com código de cores do ISC e sistema de alertas georreferenciados.

A navegação autónoma implementa uma máquina de estados com quatro modos: **STANDBY**, **SURVEY** (cruzeiro), **EVASÃO** e **REGRESSO BASE**. O modo EVASÃO é ativado por dois critérios independentes e redundantes:  $ISC < 10$  durante cinco leituras consecutivas (10 segundos), que captura contaminação progressiva; ou fecho de mais de 60% dos mexilhões, que captura derrames súbitos. Em evasão, o barco inicia o seu deslocamento a uma velocidade máxima até se afastar pelo menos 200 metros, e se necessário até o ISC recuperar acima de 40.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Comportamento Basal — Grupo Controlo

Os mexilhões do grupo controlo, mantidos em água do mar sem adição de contaminantes, exibiram um padrão de abertura estável ao longo do período de observação. Os registos do sensor Hall mostraram variação do campo magnético consistente com os ciclos naturais de abertura e fecho, refletindo a atividade de filtração normal da espécie. Estes dados constituem a linha de base do ISC individual de cada animal, face à qual serão comparadas as respostas nos grupos de exposição a contaminantes.

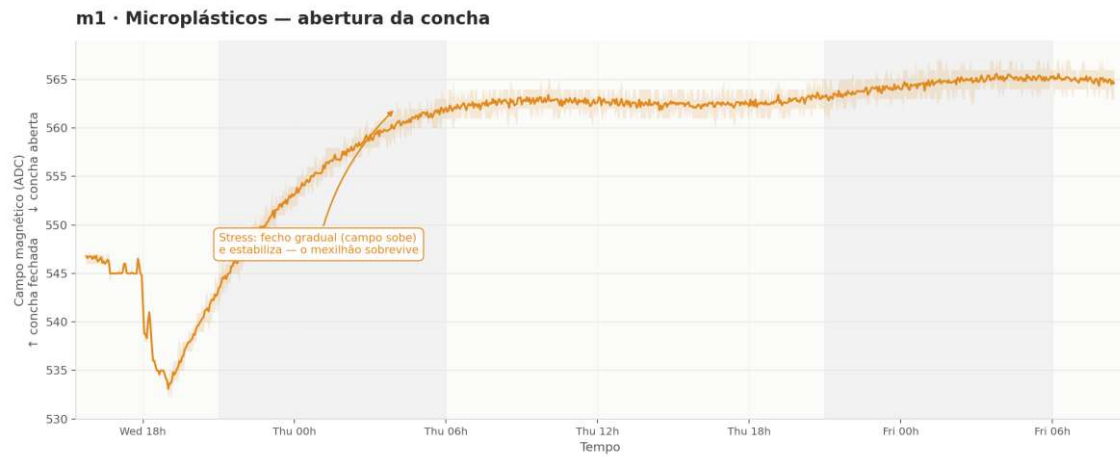
O comportamento basal confirma que os mexilhões se adaptaram às condições laboratoriais e que o sistema de instrumentação com sensores Hall e ímanes de neodímio não interfere com a atividade normal dos animais — resultado coerente com estudos anteriores que utilizaram metodologia equivalente. A **Universidade de Aveiro** acompanhou esta componente biológica do estudo, contribuindo para o rigor metodológico na interpretação do comportamento dos bivalves.

A variação observada nos ângulos de abertura do grupo controlo é principalmente explicável pelo ciclo circadiano e pela temperatura da água.



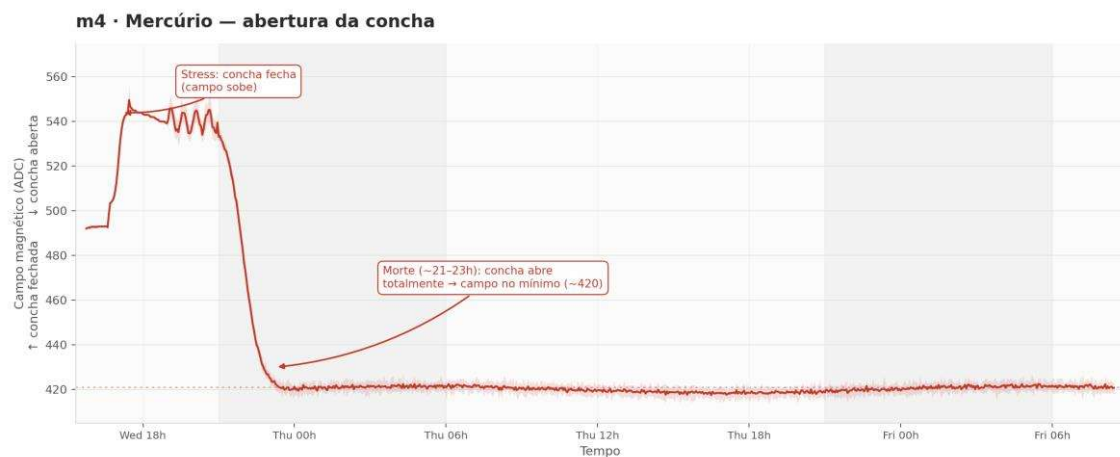
## 4.2 Resposta Comportamental a Contaminantes

### 4.2.1 Exposição a Microplásticos



comuni

### 4.2.2 Exposição a Mercúrio



## 4.3 Teste da Embarcação Autónoma

O protótipo da embarcação foi construído e testado em ambiente aquático. Os testes confirmaram flutuação estável e propulsão funcional. O sistema eletrónico a bordo — ESP32, GPS Neo-6M, LoRa e sensores Hall — funcionou de forma integrada, transmitindo telemetria em tempo real para a *groundstation*.

O mostrou-se funcional para monitorização em tempo real: a posição do barco é atualizada a cada 2 segundos no mapa, o ISC é apresentado com código de cores, e as zonas de alerta são assinaladas com marcadores georreferenciados. A máquina de estados de navegação — com transições entre STANDBY, SURVEY, EVASÃO e REGRESSO BASE — foi validada em simulação e em testes com controlo manual do ISC.

O mecanismo de evasão, com dois critérios independentes de deteção (fecho progressivo e fecho abrupto), distingue o Mussel Up de sistemas de monitorização estáticos: o barco abandona ativamente a zona contaminada, preserva os biossensores vivos para missões futuras e georreferência o evento para análise posterior.

## 5. CONCLUSÃO

O projeto Mussel Up mostrou que é possível monitorizar a qualidade da água costeira em tempo real, sem análises laboratoriais e sem intervenção humana contínua.

Os testes com o grupo controlo confirmaram que a instrumentação não perturba os animais e que o Índice de Stress Comportamental é um indicador fiável em condições normais, mantendo-se consistentemente acima de 80 durante toda a fase inicial. A literatura científica consultada sustenta que a resposta dos mexilhões a contaminantes como mercúrio e microplásticos é mensurável e distinta, o que valida a abordagem biossensora adotada.

A embarcação foi construída, testada em ambiente aquático e operou com sucesso, confirmando flutuação estável e propulsão funcional. O *dashboard web*, o sistema de alertas e a máquina de estados de navegação foram igualmente validados, incluindo o modo de evasão automática.

O sistema tem uma limitação importante a reconhecer: o ISC mede impacto biológico, não concentração química, logo o Mussel Up não substitui a análise laboratorial: o seu papel é detetar que algo está errado, georeferenciá-lo e alertar de imediato, direcionando os recursos de análise para onde são realmente necessários.

Como trabalho futuro, importa completar a análise dos dados experimentais dos grupos de exposição a microplásticos, ao mercúrio e a outros possíveis poluentes, realizar testes em ambiente marítimo real, como por exemplo na praia de Matosinhos e explorar o conceito de frota com múltiplas embarcações, que permitiria mapear a dispersão de contaminação com base nas correntes marítimas.

Em suma, o Mussel Up demonstra que é viável construir um sistema de alerta precoce de baixo custo, autónomo e sustentável para a monitorização costeira, com aplicação real e potencial de escala em Portugal e noutros países com costa marítima significativa.

## 6. AGRADECIMENTOS

Para a realização deste projeto foi essencial o apoio dos nossos colaboradores. Assim a equipa Mussel Up agradece às entidades e pessoas que tornaram este projeto possível, nomeadamente: ao *staff* e colegas do Colégio Júlio Dinis que para além de servirem de apoio motivacional, apoiaram o desenvolvimento da embarcação, do estudo laboratorial e da integração dos sistemas informáticos e eletrónicos; ao **Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro**, pelo acompanhamento científico na componente laboratorial do estudo com mexilhões, ao **Sicnave** pelo conhecimento técnico disponibilizado para a construção e impermeabilização da embarcação.

À professora orientadora **Júlia Abelha**, pelo acompanhamento, orientação, disponibilidade e incentivo ao longo de todo o desenvolvimento do projeto.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Noé Ferreira-Rodríguez, et al. “Freshwater Mussels as Sentinels for Safe Drinking Water Supply in Europe.” *ACS ES & T Water*, vol. 3, no. 12, 8 Nov. 2023, pp. 3730–3735,

<https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00012>.

Chauhan, Nidhi, et al. “A Review on Biosensor Approaches for the Detection of Hazardous Elements in Water.” *Talanta Open*, 1 Aug. 2025, pp. 100536–100536,

<https://doi.org/10.1016/j.talo.2025.100536>.

Luc A. Comeau, Jose M.F. Babarro, Angeles Longa, Xose A. Padin, et al. “Valve-gaping behavior of raft-cultivated mussels in the Ría de Arousa, Spain.” *Aquaculture Reports*, Volume 9, 2018, Pages 68-73, ISSN 2352-5134,

<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.12.005>.

David B. Kelleghan, Luke O'Callaghan, Freddie Huggard, Tasman P. Crowe, Paul R. Brooks, et al. “Using valve gape analysis to compare sensitivity of native *Mytilus edulis* to invasive *Magallana gigas* when exposed to heavy metal contamination.” *Marine Environmental Research*, Volume 189, 2023, 106043, ISSN 0141-1136,

<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106043>.

Robson, A. A., et al. “Behavioural Adaptations of Mussels to Varying Levels of Food Availability and Predation Risk.” *Journal of Molluscan Studies*, vol. 76, no. 4, 13 July 2010, pp. 348–353, [academic.oup.com/mollus/article/76/4/348/1133885](http://academic.oup.com/mollus/article/76/4/348/1133885),

<https://doi.org/10.1093/mollus/eyq025>.

Comeau & Babarro, 2012; Kelleghan et al., 2023; Robson et al., 2010).