

---

## **ESPÉCIES INVASORAS: DESAFIOS E IMPACTOS NA BIODIVERSIDADE E NA NAVEGAÇÃO**

**Estudante(s): Gabriel Rabelo de Aguiar Silva (121009834@gabarito.email), Miguel Carvalho Gonçalves da Fonseca (124014219@gabarito.email), Valentina Alves França (124014069@gabarito.email)**

**Orientador(es): Alisson Júnio Parreira Peixoto (alisson.parreira@gabarito.pro.br)**

**Coorientador(es): Danusa Radi Gomes Santiago (danusa.santiago@gabarito.pro.br);**

**Leonardo Batista Neto (leonardo.neto@gabarito.pro.br); Miriam Clemente Vella**

**(olimpiadas.udi@gabaritoeducacao.com); Mariana Bisai Quillici**

**(coordenacao1.rondon@gabarito.g12.br); Priscilla Cardoso Pereira Barbosa priscilla**

**(coordenacao7.rondon@gabarito.g12.br)**

**Escola: Gabarito Educação**

### **Resumo**

As espécies invasoras constituem uma das mais severas e negligenciadas crises ambientais da atualidade, operando como um "câncer ecológico" que corrói a integridade dos ecossistemas e impõe pesados ônus às atividades humanas. Este trabalho aprofunda-se na análise de dois emblemáticos invasores, as leucenas (*Leucaena* spp.) e os caramujos, notadamente o caramujo-gigante-africano (*Achatina fulica*) e espécies de caramujos marinhos, investigando sua íntima e perigosa relação com o comércio marítimo global. O transporte involuntário destes organismos, seja através da água de lastro, dos cascos dos navios ou de cargas contaminadas, transforma as vias navegáveis em corredores de invasão biológica. Os impactos transcendem a esfera ecológica, manifestando-se como graves problemas de saúde pública, devido à transmissão de doenças, e como significativas perdas econômicas para a agricultura, à aquicultura e a própria infraestrutura portuária. Neste contexto, este estudo não se limita a descrever os desafios, mas avança para discutir um paradigma inovador de controle, que integra a tecnologia de ponta, como sensores de DNA ambiental (eDNA) e inteligência artificial, a políticas públicas robustas e a um novo conceito de "navegação bioconsciente". A conclusão central é que combater as invasões biológicas não é apenas uma questão de preservação ambiental, mas um imperativo estratégico para a construção de uma sociedade verdadeiramente sustentável, onde o desenvolvimento econômico e a conservação da biodiversidade naveguem em direção a um futuro comum e seguro.

**Palavras-chave:** Bioinvasão, Crise Ecológica, Navegação Sustentável, Inovação Tecnológica, Saúde Planetária, Gestão Portuária Integrada.

---

## **Introdução e justificativa**

O século XX assistiu, de forma talvez irreversível, à consolidação de uma nova era geológica, o Antropoceno, na qual a atividade humana se tornou a força dominante a remodelar os sistemas naturais do planeta. Dentre as marcas mais profundas e preocupantes dessa era, destacou-se o fenômeno da homogeneização biótica global, um processo silencioso, porém devastador, de erosão da singularidade ecológica de cada região. O comércio marítimo internacional, motor da economia globalizada, revelou-se o principal arquiteto involuntário desse novo panorama. As rotas de navegação, que outrora conectaram civilizações, transformaram-se em corredores de invasão biológica, permitindo que espécies se deslocassem além de suas barreiras biogeográficas naturais, em uma escala e velocidade sem precedentes na história do planeta.

Neste contexto complexo, emergiram figuras emblemáticas de um desequilíbrio profundo: as leucenas (*Leucaena* spp.) e os caramujos, notadamente o caramujo-gigante-africano (*Achatina fulica*). A história da leucena ilustrou uma tragédia com nuances de boa intenção. Originalmente introduzida em diversas regiões tropicais, incluindo o Brasil, como uma panaceia para a revegetação de áreas degradadas e forragem animal, sua robustez e crescimento acelerado logo transcenderam a utilidade e converteram-se em uma arma ecológica. A mesma árvore que prometia recuperar solos inférteis passou a dominar paisagens, suprimindo a regeneração de espécies nativas e alterando a composição química do solo, criando "desertos verdes" de baixa diversidade. Paralelamente, a saga do caramujo-gigante-africano traçou um rastro de impactos mais diretos e visceralmente percebidos. Introduzido como uma alternativa econômica falida, ele escapou ao controle humano e proliferou-se vertiginosamente, tornando-se uma praga agrícola de proporções continentais, um vetor de agentes patogênicos causadores de doenças graves e um símbolo da degradação ambiental em áreas urbanas e rurais.

A justificativa para este estudo nasceu, portanto, da necessidade urgente de decifrar os mecanismos ocultos por trás dessas invasões. Não se tratava apenas de catalogar danos, mas de compreender a anatomia do problema em sua fonte. A investigação partiu da premissa de que navios cargueiros, os gigantes de aço que cruzam os oceanos, operam como verdadeiras "Arcas de Noé involuntárias". A água de lastro, essencial para a estabilidade das embarcações, mas frequentemente negligenciada em seu impacto ecológico, mostrou-se um vetor crítico. Em seus tanques, um ecossistema completo de organismos – de larvas de moluscos a sementes

microscópicas – realizava viagens transoceânicas, sendo descarregado em portos distantes, onde encontrava um ambiente desprevenido e vulnerável. Da mesma forma, as próprias cargas e os cascos dos navios atuavam como meio de transporte para essas espécies oportunistas.

O cerne da questão, no entanto, sempre esteve além da esfera puramente ecológica. Os impactos dessas bioinvasões reverberam profundamente no tecido social e econômico. Elas comprometem a segurança alimentar ao dizimar cultivos, oneram os sistemas de saúde pública ao introduzir novas zoonoses e impuseram custos milionários ao erário público para medidas de controle, muitas vezes paliativas. A navegação, atividade vital para o abastecimento e o desenvolvimento, carregava consigo uma "pegada biológica" invisível, uma externalidade negativa que a sociedade, em última instância, arcava.

Assim, este trabalho posicionou-se na intersecção entre a ecologia, a economia e a saúde global. Ele se propôs a investigar não apenas "o quê" e "como" dessas invasões, mas a questionar "por que" nosso modelo de intercâmbio global permanecia tão vulnerável a elas. Ao iluminar os elos entre um caramujo em um porto, uma leucena em uma pastagem e a saúde de um ecossistema inteiro, buscou-se contribuir para um diálogo mais amplo e potente: o da construção de uma resiliência sistêmica, onde o progresso econômico e a preservação da vida não fossem forças antagonicas, mas aliadas indispensáveis na navegação rumo a um futuro verdadeiramente sustentável.

## **Objetivos**

Este trabalho não se propôs a ser um mero exercício de catalogação de problemas, mas sim a empreender uma jornada investigativa multidimensional, orientada por uma tríade de objetivos fundamentais, articulados para gerar um impacto intelectual e prático significativo. Nossa ambição foi transcender a descrição superficial do fenômeno e mergulhar nas suas raízes sistêmicas, propondo, ao final, um novo paradigma de enfrentamento.

Primordialmente, nosso primeiro objetivo consistiu em desvendar a cadeia de eventos críticos e os vetores ocultos que permitem a introdução e estabelecimento de leucenas e caramujos. Isto significou ir muito além da menção genérica à água de lastro. Buscamos decifrar a cronologia de uma invasão bem-sucedida, desde o momento da embarcação no porto de origem, passando pelas condições de viagem que favorecem a sobrevivência dos organismos no tanque de lastro ou incrustados nos cascos, até o ponto de descarga no ambiente receptor. Investigamos os nichos específicos de contaminação, como os espaços confinados de

contêineres de carga e a complexidade bioquímica dos sedimentos acumulados nos tanques, compreendendo que cada etapa desta cadeia representava uma oportunidade crítica para interrupção.

Em segundo lugar, almejamos qualificar e quantificar, com o máximo de profundidade permitido pela literatura científica robusta, o espectro completo de impactos em cascata desencadeados por essas invasões. Nosso foco não se restringiu aos óbvios desequilíbrios ecológicos, como a competição por recursos. Procuramos elucidar as consequências socioeconômicas invisibilizadas: como a perda de um polinizador nativo devido ao avanço de um monocultura de leucenas pode corroer a produtividade agrícola de uma região inteira; como a infestação de um caramujo-gigante-africano pode degradar a qualidade de vida em comunidades periféricas, transformando quintais em focos de doença e despesas com saúde; ou como a incrustação de moluscos marinhos em estruturas portuárias e usinas de energia impõe um tributo bilionário à infraestrutura nacional, onerando indiretamente toda a sociedade. O propósito foi atribuir valor real, tanto em termos ecológicos quanto econômicos, à ameaça representada por essas espécies.

Por fim, e de forma mais inovadora, nosso terceiro e mais audacioso objetivo foi arquitetar e propor a estrutura de um Sistema Integrado de Vigilância e Resposta a Bioinvasões Marinhas. Esta não é uma mera lista de sugestões, mas a concepção de um modelo estratégico que sinergiza a vanguarda tecnológica com a governança colaborativa. Propusemos a integração de ferramentas de detecção precoce baseadas em DNA ambiental (eDNA), que podem identificar invasores antes de sua estabelecimento visível, com plataformas de inteligência artificial capazes de analisar big data marítimo—rotas, condições oceanográficas, histórico de invasões—para prever zonas de alto risco. Este sistema seria alimentado por uma governança inédita, envolvendo agências ambientais, autoridades portuárias, empresas de navegação e universidades em um comitê de crise permanente. O objetivo final foi transformar os portos, historicamente as portas de entrada do problema, em poderosas sentinelas da biodiversidade, posicionando o Brasil não apenas como reator às invasões, mas como um líder global na prevenção proativa deste que é um dos maiores desafios ambientais silenciosos do nosso tempo.

## **Metodologia**

A construção deste trabalho baseou-se em uma metodologia multifacetada, estruturada em três eixos principais, visando garantir robustez teórica e geração de proposições aplicáveis.

Inicialmente realizou-se uma **Investigação Bibliográfica Crítica e Contextualizada**, com análise de fontes primárias e secundárias relevantes no cenário acadêmico nacional e internacional. Foram examinados artigos indexados nas bases Scopus, Web of Science e SciELO, com foco em estudos sobre a ecologia das espécies invasoras – leucenas e caramujos – e sua dispersão associada ao transporte marítimo. Também foram analisados documentos de órgãos reguladores como a Organização Marítima Internacional (IMO), a Convenção sobre a Diversidade Biológica (CDB) e relatórios técnicos do Ministério do Meio Ambiente brasileiro. A análise adotou postura crítica, identificando lacunas legais, contradições nas estratégias de controle e limitações dos métodos tradicionais, constituindo a base diagnóstica da pesquisa.

O segundo eixo, de caráter **Analítico-Projetivo**, consistiu na desconstrução da cadeia de invasão. O processo foi modelado conceitualmente desde o embarque do organismo no porto de origem — na água de lastro, incrustações do casco ou cargas contaminadas — até sua sobrevivência na travessia e estabelecimento no ambiente receptor. A modelagem permitiu identificar pontos críticos de intervenção e evidenciou a insuficiência de abordagens reativas, indicando a necessidade de sistemas de detecção precoce.

O terceiro eixo, **Prospectivo e de Síntese Inovadora**, envolveu prospecção tecnológica nas áreas de biotecnologia ambiental, ciência de dados e monitoramento remoto. Foram avaliadas tecnologias como detecção por DNA ambiental (eDNA), sensores autônomos de análise da água e algoritmos de inteligência artificial e machine learning para previsão de riscos ecológicos. Realizou-se uma triagem estratégica considerando viabilidade técnica, custo-benefício e aplicação no contexto portuário brasileiro. A partir disso foi proposta a arquitetura conceitual de um Sistema Integrado de Vigilância e Resposta a Bioinvasões Marinhas, traduzindo conhecimento acadêmico em proposta de governança ambiental preventiva.

## **Resultados e Discussão**

A metodologia revelou um panorama interligado, no qual revisão bibliográfica, modelagem da invasão e prospecção tecnológica convergiram para compreender o problema e indicar soluções.

A investigação bibliográfica demonstrou que os impactos das espécies invasoras são amplos. As leucenas apresentam sucesso invasor associado à alelopatia e à formação de banco

de sementes persistente, tornando insuficiente a remoção das árvores adultas e gerando custos recorrentes para agricultura e pastagens. Já os caramujos representam problema também de saúde pública: além do *Angiostrongylus cantonensis*, estudos indicam presença de patógenos como *Salmonella* em seu muco, gerando impactos sanitários e psicossociais nas comunidades afetadas.

A modelagem da cadeia de invasão identificou como ponto crítico o deslastro em portos receptores, porém demonstrou que a intervenção nesse estágio é tardia. A ausência de triagem biológica no porto de origem e a dificuldade de inspeção de biofouling em cascos de navios constituem falhas relevantes. A fiscalização tradicional baseada em inspeção visual mostrou-se incapaz de detectar ameaças microscópicas.

Nesse contexto, a prospecção tecnológica indicou a aplicação de **Machine Learning** como ferramenta promissora para previsão de riscos ecológicos. O sistema proposto baseia-se na aquisição de dados multifonte: rotas de navegação, origem e destino, características da água de lastro, dados oceanográficos (temperatura, salinidade, correntes e pH) e registros biológicos, incluindo análises de eDNA. Modelos supervisionados, como redes neurais artificiais, são treinados com dados históricos de viagens e ocorrências de invasão, aprendendo padrões de correlação entre variáveis ambientais e estabelecimento de espécies.

Após validado, o sistema operaria em tempo real, gerando alertas de risco biológico antes da atracação do navio. Esses alertas permitiriam inspeção prioritária, análise obrigatória de eDNA ou tratamento da água de lastro em alto-mar. Projetos semelhantes já existem em iniciativas da IMO e pesquisas conduzidas no Canadá, Austrália e Estados Unidos, como o trabalho do CSIRO na previsão de distribuição de espécies invasoras.

Assim, a gestão deixa de ser reativa e passa a preventiva, permitindo antecipar ameaças à biodiversidade e à economia

Conclusões.

A pesquisa demonstrou que leucenas e caramujos constituem ameaça multidimensional. As leucenas alteram a química do solo e geram impactos econômicos na produção agrícola, enquanto os caramujos atuam como vetores de doenças e problema de saúde pública. O transporte marítimo foi identificado como principal vetor de dispersão biológica. Concluiu-se que a tríade tradicional de conscientização, fiscalização e prevenção é necessária, porém insuficiente diante da escala do problema. A fiscalização visual apresenta baixa eficiência para detecção precoce.

Como contribuição principal, propõe-se um **Sistema Integrado de Vigilância e Resposta a Bioinvasões Marinhas**, fundamentado em inteligência artificial e aprendizado de máquina. A análise de rotas marítimas, parâmetros ambientais e registros biológicos permite transformar incerteza em probabilidade de risco, orientando ações direcionadas e otimizando recursos. O trabalho, portanto, apresenta uma proposta concreta de segurança biológica portuária baseada em ciência de dados, integrando atividade econômica e conservação ambiental e convertendo a gestão portuária em um modelo preventivo e tecnologicamente orientado.

### Referências

- Galil, B. S. (2007). *Invasion Biology*. Springer.
- IOC-UNESCO. (2014). *Manual de controle de espécies invasoras*.
- Ministério do Meio Ambiente - Brasil. (2020). *Espécies invasoras no Brasil*.
- United Nations. (2018). *Maritime transport and invasive species*.
- CARLTON, J. T. Global change and biological invasions in the oceans. In: CARLTON, J. T. (Ed.). *The Encyclopedia of Biological Invasions*. Berkeley: University of California Press, 2011. p. 45-56.
- LOWE, S.; BROWNE, M.; BOUDJELAS, S.; DE POORTER, M. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species: A selection from the Global Invasive Species Database. The Invasive Species Specialist Group (ISSG), 2000.
- GEYER, K. K.; et al. The invasive apple snail *Pomacea canaliculata* in Asia: a review of its ecology and management. *Pest Management Science*, v. 77, n. 10, p. 4327-4336, 2021.
- IMO (International Maritime Organization). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments*. London: IMO, 2004.
- DARLING, J. A.; et al. The role of environmental DNA (eDNA) in tracking biological invasions over space and time. *Molecular Ecology*, v. 30, n. 23, p. 5937-5951, 2021.
- TABERLET, P.; COISSAC, E.; HAJIBABAEI, M.; RIESEBERG, L. H. *Environmental DNA: For Biodiversity Research and Monitoring*. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- LIU, C.; et al. Predicting the potential global distribution of the African giant snail (*Achatina fulica*) using machine learning models. *Journal of Pest Science*, v. 95, p. 1407-1420, 2022.

---

SEEBENS, H.; et al. Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050. *Global Change Biology*, v. 27, n. 5, p. 970-982, 2021. (*Este estudo utiliza modelagem que pode ser associada a técnicas de machine learning*).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Estratégia Nacional sobre Espécies Exóticas Invasoras. Resolução CONABIO nº 8, de 2018.

LATINI, A. O.; et al. Espécies exóticas invasoras em ambientes aquáticos: estudos de caso e subsídios para o manejo. Brasília: MMA, 2020.

CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). eDNA for monitoring marine pests. Austrália. Disponível em: <https://www.csiro.au/en/research/animals/edna>. (Exemplo de instituição que integra eDNA e análise de dados).

GOLDMEDAL. AI-powered risk assessment for maritime safety and environmental protection. (Empresas do setor marítimo já começam a oferecer soluções baseadas em IA). Disponível em: <https://www.goldmedal.com.tw/>.