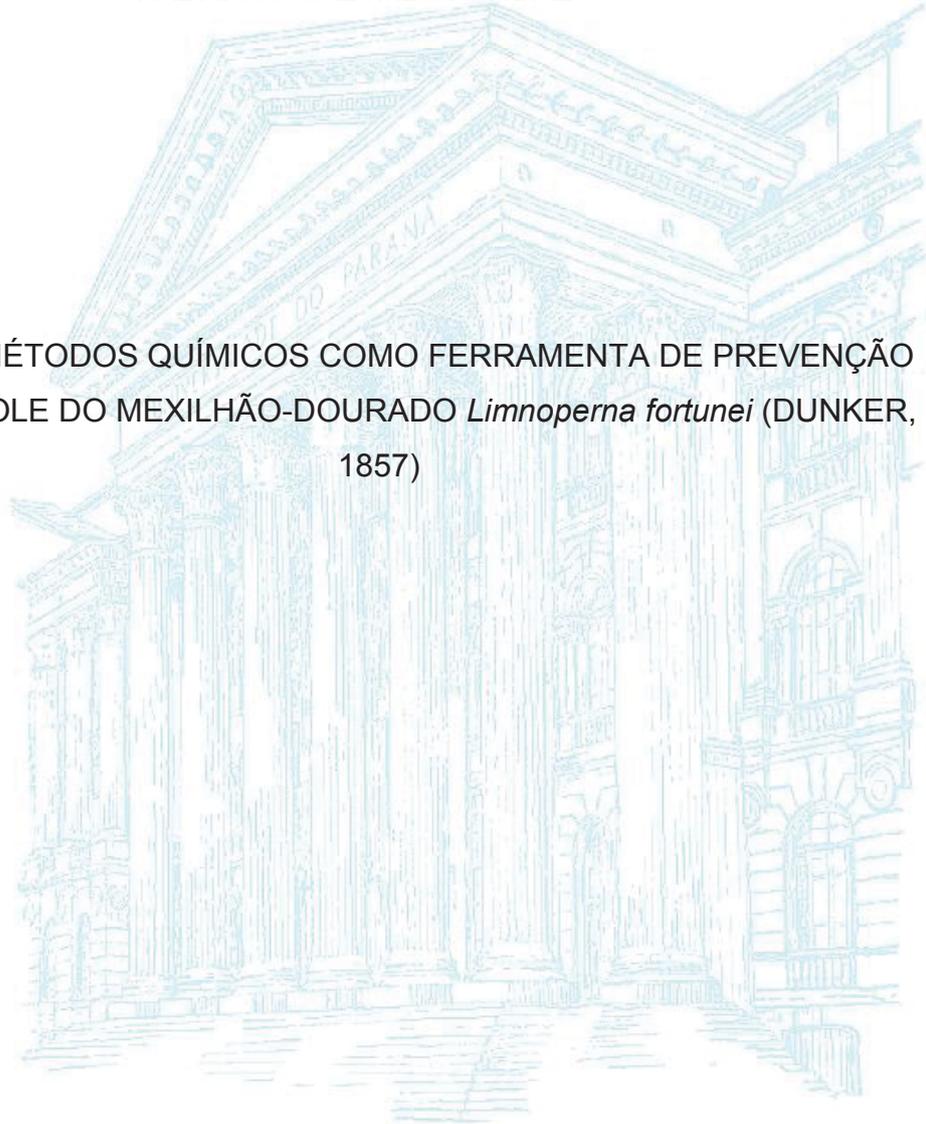


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABRÍCIO SALVADOR VIDAL

USO DE MÉTODOS QUÍMICOS COMO FERRAMENTA DE PREVENÇÃO
E CONTROLE DO MEXILHÃO-DOURADO *Limnoperna fortunei* (DUNKER,
1857)



CURITIBA

2019

FABRÍCIO SALVADOR VIDAL

USO DE MÉTODOS QUÍMICOS COMO FERRAMENTA DE PREVENÇÃO
E CONTROLE DO MEXILHÃO-DOURADO *Limnoperna fortunei* (DUNKER,
1857)

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Zootecnia, no Curso de Pós-Graduação em Zootecnia, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Ostrensky

CURITIBA

2019

V648u Vidal, Fabrício Salvador
Uso de métodos químicos como ferramenta de prevenção e controle do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) / Fabrício Salvador Vidal. - Curitiba, 2019.
82 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia.
Orientador: Antonio Ostrensky

1. Bioinvasão. 2. Mexilhão. 3. Toxicidade. 4. Bioquímica. I. Ostrensky, Antonio. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDU 639.42



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ZOOTECNIA -
40001016082P0

TERMO DE APROVAÇÃO

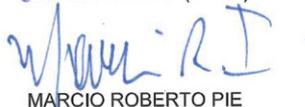
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ZOOTECNIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **FABRICIO SALVADOR VIDAL** intitulada: **Uso de métodos químicos como ferramenta de prevenção e controle do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2019.


ANTONIO OSTRENSKY NETO
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


GIORGI DAL PONT
Avaliador Externo (UFPR)


MARCIO ROBERTO PIE
Avaliador Externo (UFPR)

À minha esposa Andréia e minhas filhas Heloiza e Inaiê.

AGRADECIMENTOS

Durante estes dois anos de caminhada foram muitas as pessoas que me oportunizaram seus ensinamentos e, sobretudo, compartilharam valores como amizade, companheirismo e generosidade.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus Guias e Mentores por essa oportunidade e, principalmente, por estarem ao meu lado em mais esta etapa da construção do meu ser.

Agradeço em especial ao meu orientador professor Dr. Antonio Ostrensky que, através da sua generosidade e do grande ser humano que é, me fez sentir novamente a paixão por aprender e ensinar ciência. Ao amigo Antonio, o meu mais sincero respeito.

Aos meus colegas do GIA, agradeço pelos conselhos e, fundamentalmente, pelo apoio incondicional em todas as etapas deste trabalho. Um agradecimento especial ao colega Diego Stevanatto pelas importantes contribuições na discussão do trabalho e pela grande ajuda nas fases de campo e durante os ensaios laboratoriais. À todos os estagiários do GIA pela essencial ajuda nos ensaios laboratoriais. Ao colega Jun, agradeço pela grande ajuda na manutenção dos organismos testes e pela sua dedicação durante os experimentos.

Agradeço a COPEL e aos funcionários da empresa que permitiram e auxiliaram na etapa de coleta do mexilhão-dourado.

Agradeço a Universidade Federal do Paraná e ao departamento de Zootecnia pela oportunidade de concluir mais esta etapa de meus estudos.

À minha família, o meu amor incondicional e meu eterno obrigado.

“Eu acredito que há um sutil magnetismo na natureza e se, inconscientemente, a ele cedermos, nos guiará da maneira certa.”

Henry David Thoreau

RESUMO

A busca por métodos mais eficientes de controle de incrustações causadas pelo mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos, como os de usinas hidrelétricas e estações de tratamento de água, passa tanto pela avaliação da eficiência dos produtos utilizados, quanto pelos riscos ambientais e operacionais a eles associados. As concentrações desses produtos e as condições de operação, também são considerados fatores-chave para a obtenção de resultados satisfatórios. Os métodos químicos são seguramente os mais empregados no controle de incrustações, em vários países, no entanto, também são considerados potenciais fontes de contaminação dos ambientes aquáticos. Logo, o objetivo deste estudo foi identificar e avaliar a eficiência dos principais compostos químicos utilizados no controle do mexilhão-dourado *L. fortunei* em sistemas hidráulicos, bem como avaliar os potenciais problemas ambientais e operacionais relacionados. Ainda, este estudo procurou determinar a toxicidade aguda de quatro produtos químicos (dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD-100 e Ferbax® Contato) utilizados ou potencialmente utilizados no controle de *L. fortunei* no Brasil. As informações, obtidas através de uma extensa revisão bibliográfica, foram analisadas de forma comparativa, estabelecendo-se campos de relevância, no plano da comparação, para as variáveis: eficiência, impactos ambientais e impactos operacionais. Os principais compostos químicos usados no controle do *L. fortunei*, identificados por este estudo foram: gás amônia, Bayluscide WP70®, BULAB 6002®, CLAM-TROL CT2™, gás cloro, dicloroisocianurato de sódio, dióxido de titânio, H-130M, hidróxido de sódio, MXD-100 e sulfato de cobre. Entre os produtos investigados, o hidróxido de sódio foi o que apresentou os melhores resultados e o gás cloro o pior. Características como a não seletividade em relação à espécie alvo; a geração de resíduos ou subprodutos tóxicos no ambiente; e uma série de indicadores de perigo, representam um conjunto de fragilidades que limitam a eficiência ou adequação dos métodos químicos atualmente empregados. Os indicadores utilizados para avaliar a toxicidade do dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD-100 e Ferbax® Contato foram: concentração letal mediana (CL₅₀) e concentração letal 10% (CL₁₀). Os testes de toxicidade aguda foram realizados em condições laboratoriais controladas, envolveram o uso de sistemas semi-estáticos, utilizando 80 indivíduos por tratamento e tendo duração de exposição de 96 h. As CL₅₀ 96 h foram calculadas em: 2,01 mg.L⁻¹ para o dicloroisocianurato de sódio; 0,20 mL.L⁻¹ para o MXD-100; e 0,03 mL.L⁻¹ para o Ferbax® Contato. Além disso, estimou-se em 10,9 o pH necessário para provocar a morte de 50% dos organismos testados em 96 h. Os resultados aqui obtidos estabelecem, pela primeira vez, o grau de toxicidade do Ferbax® Contato, ao mesmo tempo que atestam o grau de toxicidade do dicloroisocianurato de sódio, do hidróxido de sódio e do MXD-100 para *L. fortunei*. Portanto, o reconhecimento dos métodos químicos, bem como, sua eficiência no controle de incrustação do *L. fortunei*, são ferramentas que irão contribuir para a busca de novos métodos que sejam menos impactantes ao ambiente e que minimizem os riscos nos processos de operacionais, além de serem economicamente viáveis.

Palavras chave: bioincrustações; invasão biológica; métodos de controle; toxicidade; biocidas; CL₅₀; CL₁₀.

ABSTRACT

The search for more efficient methods of scale control caused by the golden mussel *Limnoperna fortunei* in hydraulic systems such as hydroelectric plants and water treatment plants goes through both the evaluation of the efficiency of the products used and the environmental and operational risks to associated with them. The concentrations of these products and the operating conditions are also considered as key factors to obtain satisfactory results. Chemical methods are certainly the most used in scale control in several countries, however, they are also considered potential sources of contamination of environments aquatic. Therefore, the objective of this study was to identify and evaluate the efficiency of the main chemical compounds used in the control of the golden mussel *L. fortunei* in hydraulic systems, as well as to evaluate the potential related environmental and operational problems. Furthermore, this study aimed to determine the acute toxicity of four chemicals (sodium dichloroisocyanurate, sodium hydroxide, MXD-100 and Ferbax® Contact) used or potentially used in the control of *L. fortunei* in Brazil. The information, obtained through an extensive bibliographic review, was analyzed in a comparative way, establishing fields of relevance, in the comparison plane, for the variables: efficiency, environmental impacts and operational impacts. The major chemical compounds used to control *L. fortunei* identified by this study were ammonia gas, Bayluscide WP70®, BULAB 6002®, CLAM-TROL CT2™, chlorine gas, sodium dichloroisocyanurate, titanium dioxide, H-130M, sodium hydroxide, MXD-100 and copper sulphate. Among the products investigated, sodium hydroxide was the one that presented the best results and chlorine gas the worst. Characteristics such as non-selectivity in relation to the target species; the generation of toxic wastes or by-products in the environment; and a series of hazard indicators represent a set of weaknesses that limit the efficiency or suitability of the chemical methods currently employed. The indicators used to assess the toxicity of sodium dichloroisocyanurate, sodium hydroxide, MXD-100 and Ferbax® Contact were: median lethal concentration (LC50) and lethal concentration 10% (LC10). Acute toxicity tests were performed under controlled laboratory conditions, involving the use of semi-static systems, using 80 individuals per treatment and having a 96 h exposure duration. The 96 h LC50 were calculated as: 2.01 mg.L⁻¹ for sodium dichloroisocyanurate; 0.20 mL.L⁻¹ for MXD-100; and 0.03 mL.L⁻¹ for the Ferbax® Contact. In addition, the pH required to cause the death of 50% of the organisms tested in 96 h was estimated at 10.9. The results obtained here establish, for the first time, the degree of toxicity of Ferbax® Contact, while attesting the degree of toxicity of sodium dichloroisocyanurate, sodium hydroxide and MXD-100 to *L. fortunei*. Therefore, the recognition of the chemical methods, as well as their efficiency in the control of *L. fortunei* scale, are tools that will contribute to the search for new methods that are less impacting to the environment and that minimize the risks in the operational processes, besides economically viable.

Keywords: biofouling; biological invasion; control methods; toxicity; biocides; LC50; LC10.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Síntese da metodologia prisma aplicada na seleção dos documentos para identificação e avaliação de métodos de controle químico para o combate de incrustações do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei*.....22

Figura 1.2. Agrupamento dos produtos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas, de acordo com seus impactos negativos (operacionais e ambientais) e positivos (eficiência). 34

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Mortalidade acumulada de *Limnoperna fortunei* expostos às diferentes concentrações do Dicloroisocianurato de sódio, Hidróxido de sódio, MXD-100® e Ferbax® Contato. As barras indicam o erro padrão. 59

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1. Principais compostos e produtos químicos utilizados no controle do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos.....25

Tabela 1.2. Classificação dos produtos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas de acordo com seus impactos operacionais e ambientais (impactos negativos) e sua eficiência (impactos positivos) comparativa.....31

Tabela 1.3. Resultado Final Agrupado do processo de avaliação dos produtos químicos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei*.....34

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1. Produtos químicos utilizados nos testes de toxicidade aguda para *Limnoperna fortunei*, suas principais características e legislação de uso em sistemas hidráulicos no Brasil.....47

Tabela 2.2. Concentrações dos produtos químicos comerciais utilizadas na avaliação dos efeitos da exposição aguda de *Limnoperna fortunei*.....53

Tabela 2.3. Síntese das condições experimentais utilizadas nos testes preliminares e de definitivos de toxicidade aguda para *Limnoperna fortunei*.....54

Tabela 2.4. Parâmetros de qualidade da água monitorados durante a exposição aguda ao dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD100 e Ferbax® Contato em exemplares de *Limnoperna fortunei*.....57

Tabela 2.5. Indicadores de toxicidade calculados para diferentes produtos durante a exposição aguda de *Limnoperna fortunei* por 96 horas.....60

ANEXO I

Tabela 3.1. Impactos ocasionados pelo mexilhão-dourado <i>Limnoperna fortunei</i> em ambientes dulcícolas.....	79
--	----

LISTA DE SIGLAS

CAS – Chemical Abstract Service

CL10 – Concentração letal (10%)

CL50 – Concentração letal (50%)

EPA – Environmental Protection Agency

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

LC10 – Lethal concentração (10%)

LC50 – Lethal concentration (50%)

mL.L⁻¹ – Mililitro por litro

mg.L⁻¹ - Miligramas por litro

CO₂ – Dióxido de carbono

HOCl – Ácido hipocloroso

NaOH – Hidróxido de sódio

NO₂ – Dióxido de nitrogênio

NO₃ – Nitrato

N-AT – Amônia

N-NH₃ – Nitrogênio amoniacal

N-NO₂ - Nitrito

Al – Alumínio

Mg – Magnésio

Sn – Estanho

Zn - Zinco

pH – Potencial hidrogênio

OD – Oxigênio dissolvido

OS – Percentual de saturação de oxigênio

TiO₂ – Dióxido de titânio

°C – Grau Celsius

I_{negativo} – Impacto negativo

I_{positivo} – Impacto positivo

Σ – Soma

ND – Não disponível

h – Unidade de tempo (horas)

LAPOA – Laboratório de Pesquisas com Organismos Aquáticos

GIA – Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos Ambientais

UFPR – Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1. PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO CONTROLE DO MEXILHÃO-DOURADO <i>LIMNOPERNA FORTUNEI</i> (DUNKER, 1857) EM SISTEMAS HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS	18
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	21
1.3 RESULTADOS	24
1.4 DISCUSSÃO	35
1.5 CONCLUSÃO.....	42
CAPÍTULO 2. TOXICIDADE DO DICLOROISOCIANURATO DE SÓDIO, HIDRÓXIDO DE SÓDIO, MXD-100 E DO FERBAX® CONTATO PARA O MEXILHÃO-DOURADO <i>LIMNOPERNA FORTUNEI</i> (DUNKER, 1857)	43
2.1 INTRODUÇÃO	43
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.2.1 OBTENÇÃO E MANUTENÇÃO DOS ORGANISMOS-TESTE	45
2.2.2 PRODUTOS TESTADOS.....	46
2.2.3 TESTES PRELIMINARES.....	50
2.2.4 TESTES DEFINITIVOS.....	54
2.2.5 QUALIDADE DA ÁGUA.....	54
2.2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E TOXICOLÓGICAS	55
2.3 RESULTADOS	55
2.4 DISCUSSÃO	60
CONCLUSÃO GERAL	64
BIBLIOGRAFIA	65
ANEXO I.....	79

APRESENTAÇÃO GERAL

Invasões biológicas podem ter origem tanto a partir de processos naturais como por ações antrópicas, intencionais ou não-intencionais (Ricciardi e MacIsaac 2000, Richardson, Pysek et al. 2000). Essas invasões são facilitadas pela existência de corredores de dispersão (rotas aquáticas, terrestres ou aéreas) ou pela maior vulnerabilidade e menor resistência biótica encontrada em ambientes previamente alterados (Heger e Trepl 2003, Ferreira, Gonçalves et al. 2004, Darrigran e Damborenea 2009, Souza, Calazans et al. 2009).

O processo de bioinvasão pode ser dividido em quatro etapas: i) entrada, quando efetivamente a espécie chega a um ou mais pontos do ecossistema (Andersen, Adams et al. 2004); ii) estabelecimento, quando a espécie começa a se reproduzir e tenta evitar a sua extinção no novo ambiente (Neubert, Kot et al. 2000); iii) dispersão, quando a espécie passa a ocupar os habitats disponíveis (Kolar e Lodge 2001), e iv) impacto, quando a espécie se estabelece e passa a competir com outras espécies em seu novo ambiente (Kot, Lewis et al. 1996), causando prejuízos ambientais e econômicos.

A magnitude dos impactos provocados pelas espécies invasoras está geralmente associada aos seus mecanismos de dispersão (Espínola e Ferreira Júlio 2007); às características biológicas do organismo invasor (Rejmanek e Richardson 1996, Morton 1997, Crooks, Soulé et al. 1999, Kolar e Lodge 2001); e à susceptibilidade do habitat a ser invadido (Davis e Thompson 2000, Richardson, Pysek et al. 2000, Daehler 2001, Espínola e Ferreira Júlio 2007, Darrigran e Damborenea 2009).

Os macroinvertebrados bentônicos, com destaque para os moluscos, crustáceos e poliquetas (Franklin Junior, Matthews-Cascon et al. 2005), estão entre os organismos invasores que mais causam impactos em ambientes aquáticos dulcícolas (Silva e Barros 2011). Entre os moluscos invasores, duas classes se destacam: gastropoda e bivalvia (Callil 2003, Santos, Thiengo et al. 2012), sendo que os maiores danos ambientais e econômicos estão geralmente associados às espécies incrustantes, como é o caso de *Dreissena bugensis* (mexilhão-quagga) (Mills, Rosenberg et al. 1996), *Musculista senhousia* (mexilhão-verde) (Crooks, Soulé et al. 1999), *Dreissena polymorpha* (mexilhão-

zebra) (Johnson e Carlton 1996) e *Limnoperna fortunei* (mexilhão-dourado) (Morton 1996).

Essas espécies podem levar à redução da quantidade de materiais particulados em suspensão na coluna d'água, transferindo-os aos sedimentos de fundo na forma de fezes e pseudofezes e, desta forma, provocar alterações na dinâmica de nutrientes e de oxigênio dissolvido, afetando o ecossistema como um todo (Sylvester, Boltovskoy et al. 2009). Algumas espécies, como *L. fortunei* e *D. polymorpha* podem inclusive interagir diretamente com níveis tróficos superiores, por exemplo, ao ser incorporadas à cadeia alimentar de algumas espécies de peixes de água doce (Ferriz et al. 2000, Pechaszadhe et al. 2000, Cataldo et al. 2002, Belz 2006).

Esses moluscos também causam prejuízos em escala econômica, interferindo direta e indiretamente em atividades antrópicas que dependem dos recursos naturais (Kolar e Lodge 2001, Orensanz, Schwindt et al. 2002). Entre as instalações que costumam ser mais afetadas pela ação dos moluscos bentônicos incrustantes estão as estações de tratamento de água e as usinas hidrelétricas (Martinez, de Resende et al. , O'Neill Jr 1997, de Resende 2014). Ao se fixarem no interior das tubulações, equipamentos e estruturas hidráulicas, esses organismos podem impedir parcial ou totalmente o fluxo de água, provocando perdas significativas de produtividade, além de ocasionarem danos físicos às próprias estruturas (Darrigran e Pastorino 1995, Ricciardi 1998, Darrigran e Ezcurra de Drago 2000). O controle de organismos incrustantes em instalações que envolvem o uso contínuo de grandes volumes de água tornou-se um dos grandes desafios dos dias atuais. Segundo O'Neill Jr (1997), instalações hidráulicas de estações tratamento da água e de usinas hidrelétricas estão entre as que mais sofrem com as bioincrustações.

O *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), popularmente conhecido como mexilhão-dourado é um bivalve nativo de ambientes dulcícolas do sudeste asiático, que apresenta um histórico de invasão relatada em países como: Japão, Taiwan; e sulamericanos como: Argentina, Uruguai, Paraguai e Brasil. Sua dispersão entre continentes se deu, principalmente por rotas aquáticas, através da água de lastro de navios cargueiros. A espécie apresenta rápido crescimento, comportamento gregário e forma densas colônias, características que efetivaram

a espécie como bioinvasora. O *L. fortunei* está entre os organismos invasores que mais provocam impactos em ambientes aquáticos dulcícolas, afetando o ecossistema como um todo. Além dos prejuízos ambientais, a espécie é responsável por prejuízos em escala econômica, interferindo direta e indiretamente em atividades antrópicas que dependem dos recursos naturais presentes nesses ambientes. Entre as instalações mais afetadas estão as estações de tratamento de água e as usinas hidrelétricas, ao se fixar no interior das instalações hidráulicas impedem parcial ou totalmente o fluxo de água, reduzindo a produtividade e ocasionando danos físicos à própria estrutura.

O presente trabalho avalia e descreve os efeitos dos compostos químicos utilizados na tentativa de combate às incrustações do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos industriais.

A dissertação é constituída por dois capítulos e um anexo: o capítulo 1, “Principais Métodos Químicos Utilizados no Controle do Mexilhão-Dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) em Sistemas Hidráulicos”, visando identificar e avaliar a eficiência dos principais métodos químicos utilizados no combate às incrustações de *L. fortunei* em sistemas hidráulicos, bem como descrever os problemas associados às questões econômicas e ambientais.

Uma vez definidos os métodos químicos, no capítulo 2, intitulado, “Toxicidade Do Dicloroisocianurato De Sódio, Hidróxido De Sódio, Mxd-100 e Ferbax Contato® para o Mexilhão-Dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)”, faz-se a determinação das concentrações letais medianas (CL₅₀) de cada um dos produtos químicos testados durante o período de 96 horas de exposição.

No anexo 1 são apresentados, de forma sumarizada, os principais impactos ambientais e econômicos já descritos e associados à presença de *L. fortunei* em ambientes aquáticos invadidos.

CAPÍTULO 1. PRODUTOS QUÍMICOS UTILIZADOS NO CONTROLE DO MEXILHÃO-DOURADO *LIMNOPERNA FORTUNEI* (DUNKER, 1857) EM SISTEMAS HIDRÁULICOS INDUSTRIAIS

RESUMO

A busca por métodos mais eficientes de controle de incrustações causadas pelo mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos, como os de usinas hidrelétricas e estações de tratamento de água, passa tanto pela avaliação da eficiência dos produtos utilizados, quanto pelos riscos ambientais e operacionais a eles associados. O objetivo deste estudo foi identificar e avaliar a eficiência dos principais compostos e produtos químicos utilizados no controle do mexilhão-dourado *L. fortunei* em sistemas hidráulicos, bem como avaliar os potenciais problemas ambientais e operacionais relacionados. As informações, obtidas através de uma extensa revisão sistemática da literatura e aplicação da metodologia prisma, foram analisadas de forma comparativa. Os principais produtos químicos identificados foram: gás amônia, Bayluscide WP70®, BULAB 6002®, CLAM-TROL CT2™, gás cloro, dicloroisocianurato de sódio, dióxido de titânio, H-130M, hidróxido de sódio, MXD-100 e sulfato de cobre. Entre os produtos investigados, o hidróxido de sódio foi o que apresentou os melhores resultados e o gás cloro o pior. Os resultados permitem concluir que, características como a não seletividade em relação à espécie alvo; a geração de resíduos ou subprodutos tóxicos no ambiente; e uma série de indicadores de perigo, representam um conjunto de fragilidades que limitam a eficiência ou adequação dos métodos químicos atualmente empregados.

Palavras-chave: bioincrustações; invasão biológica; métodos de controle; biocidas

1.1 INTRODUÇÃO

Limnoperna fortunei (Dunker, 1857), popularmente conhecido como mexilhão-dourado, é um bivalve nativo de ambientes dulcícolas do sudeste asiático, sendo naturalmente encontrado na China (Miller e McClure 1931), Tailândia (Mizuno e Mori 1970, Brandt 1974), Laos, Camboja, Vietnã, Indonésia (Brandt 1974) e Coréia do Sul (Uryu, Iwasaki et al. 1996, Ghabooli, Zhan et al. 2013).

Os primeiros registros da bioinvasão de *L. fortunei* datam de 1965, em Hong Kong (Morton 1973). Posteriormente, a espécie foi relatada no Japão (Kimura 1994, Nakai 1995) e em Taiwan (Ricciardi 1998), na década de 1990. Desde então, o seu ritmo de invasão se acelerou, em 1991 *L. fortunei* passou a

ser encontrada no rio da Prata, na Argentina (Pastorino, Darrigran et al. 1993); 1995 foi registrado no Uruguai; 1997 no Paraguai (Darrigran e Ezcurra de Drago 2000); e no final da década de 90 foram feitos os primeiros registros no Brasil (Mansur, Richinitti et al. 1999).

Limnoperna fortunei apresenta ciclo de vida que envolve uma fase larval (planctônica) e uma fase juvenil/adulta, na qual os animais são capazes de se fixar fortemente a praticamente todo e qualquer tipo de substrato, a partir de uma estrutura anatômica denominada “bisso” (Morton 1973, Huang, Li et al. 1981, Darrigran e Pastorino 1995, Boltovskoy e Cataldo 1999). A espécie apresenta rápido crescimento, comportamento gregário e forma densas colônias, que podem usualmente conter mais de 80.000 indivíduos/m² (Jenner, Whitehouse et al. 1998, Darrigran 2002, Santos, Mansur et al. 2008, Costa, Aldridge et al. 2011), podendo, em casos extremos, chegar a 240.000 indivíduos/m² (Darrigran e Mansur 2009). *Limnoperna fortunei* atinge a maturidade sexual no primeiro ano de vida (Morton 1996, Darrigran 1999), sendo capaz de gerar até 28.000 ovos por fêmea (Cataldo e Boltovskoy 2000). Boltovskoy e Cataldo (1999), descrevem densidades larvais no plâncton superiores a 20.000 indivíduos/m³.

A dispersão da espécie pode se dar entre continentes, através da água de lastro de navios cargueiros (Ricciardi 1998, Belz 2006, Leitão 2011), ou regionalmente, facilitada pelas características biológicas intrínsecas da espécie, como alta prolificidade, existência de estágio larval, hábito alimentar filtrador, e capacidade de fixação aos mais diferentes tipos de substratos (Pestana, Ostrensky et al. 2010). Segundo Belz, Boeger et al. (2005) e Belz (2006), a dispersão em nível regional pode ocorrer através da movimentação de pequenas embarcações ou durante a retirada e transporte de areia de um rio ou lago já invadido. Pode ocorrer ainda durante o transporte de alevinos para abastecimento de empreendimentos de aquicultura (Pestana, Ostrensky et al. 2010) ou através do transporte de água (Claudi e de Oliveira 2015); em vestuários, calçados, equipamentos e caixas de embalagens (Darrigran 2002, Drago, Montalto et al. 2009, Silva e Barros 2011); e até fixadas em pés e bicos de aves migratórias (de Oliveira, Fugii et al. 2010).

Sua presença nos ambientes invadidos vêm ocasionando diversos impactos ambientais, principalmente relacionados com a modificação de habitats

(Morton 1977, Darrigran e Ezcurra de Drago 2000, Sylvester, Boltovskoy et al. 2007 e Sardiña, Cataldo et al. 2008), na alteração da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas (Caraco, Cole et al. 1997, Phelps 1994, Boltovskoy, Karatayev et al. 2009 e Boltovskoy e Correa 2015), o que pode ocasionar prejuízos para as espécies nativas de bivalves com a competição por recursos e espaço (Strayer e Smith 1996, Darrigran 2002, Sylvester, Boltovskoy et al. 2007, e Molina e Williner 2013), afetando as demais espécies locais pela redução das concentrações de oxigênio dissolvido em função das elevadas densidades de indivíduos e consequente acúmulo de fezes e pseudofezes (Effler e Siegfried 1994, Sylvester, Boltovskoy et al. 2009). Além dos impactos ambientais, o *L. fortunei* vêm ocasionando prejuízos no setor de geração de energia elétrica, ocasionando o entupimento de grades da tomada d'água (Ricciardi 1998 e Darrigran e Damborenea 2005, Almeida Diniz 2010), reduzindo o diâmetro útil de tubulações e redução da do fluxo de água em sistemas de resfriamento ((Darrigran e Ezcurra de Drago 2000), Darrigran 2002 e Matsui, Nagaya et al. 2002), o que acaba diminuindo a vida útil dos equipamentos e comitantemente aumento de custos com procedimentos de limpezas e manutenção (Darrigran e Damborenea 2005, Phillips, Darland et al. (2005) e Bergmann, Mansur et al. (2010).

Tentando minimizar os prejuízos ocasionados pela espécie, o setor hidroelétrico tenta envolver diferentes métodos biológicos, físicos e químicos, aplicados individualmente ou associados entre si (Boltovskoy e Cataldo 1999) ao combate das bioincrustações. Esses métodos são essencialmente semelhantes aos já utilizados na tentativa de controle de outros bivalves, como é caso do mexilhão-zebra *Dreissena polymorpha* (Pallas 1771), (Brugnoli e Clemente 2002, Cataldo, Boltovskoy et al. 2002, Matsui, Nagaya et al. 2002). Pimentel, Zuniga et al. (2005) relataram que no início deste século o combate a *D. polymorpha* envolvia, apenas na América do Norte, custos anuais da ordem de US\$ 1 bilhão. Ainda assim, não há registros até o momento de nenhum método que tenha sido considerado definitivo ou mesmo altamente eficaz no controle desses organismos incrustantes.

Métodos químicos de controle foram os primeiros a serem usados e são seguramente os mais comumente empregados no combate a incrustações

biológicas em todo o mundo (Claudi 1994, Jenner, Whitehouse et al. 1998). Compostos e produtos comerciais a base de amônia, cloro, hidróxido de sódio, sulfato de cobre, entre outros, são utilizados na tentativa de controlar incrustações causadas por organismos tão diversos como bactérias, poliquetas e moluscos (Rajagopal, van der Velde et al. 2002). Mas, apesar de serem amplamente utilizados, as consequências ambientais dos métodos químicos de controle ainda não são suficientemente bem compreendidas (Filippo 2003, Felix 2011).

O objetivo do presente trabalho é identificar e avaliar a eficiência de compostos e produtos químicos utilizados no controle de bioincrustações causadas por *L. fortunei* em sistemas hidráulicos, bem como avaliar os problemas ambientais e operacionais associados.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação quali-quantitativa dos produtos químicos utilizados no controle do *L. fortunei* foi realizada uma revisão sistemática com base em informações bibliográficas e/ou em registros industriais envolvendo dados publicados até dezembro de 2018. Para isso, utilizou-se a metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews e Meta-Analyses) (Mother *et al.* 2009), sintetizada na (Figura 1.1).

A revisão bibliográfica foi realizada utilizando-se as plataformas científicas Wiley Online Library, Thompson Reuters (ISI-Web of Science), Science Direct, Springer, Web of Science, Scopus e Google Acadêmico. Foram buscados livros, artigos técnicos e científicos, estudos de caso, teses e dissertações aplicando sempre as mesmas palavras-chave, tanto em português, inglês e em espanhol: "impactos econômicos" "Limnoperna fortunei"; "impactos ambientais" "Limnoperna fortunei"; "impactos operacionais" "Limnoperna fortunei"; "métodos químicos" "Limnoperna fortunei"; "controle químico" "Limnoperna fortunei"; "implicações do controle" "Limnoperna fortunei"; "estratégias de controle" "Limnoperna fortunei"; "estratégias químicas" "Limnoperna fortunei" e "controle de biofouling" "Limnoperna fortunei". Na primeira etapa (seleção 1), foram eliminados os trabalhos em duplicidade. Em seguida, avaliou-se os trabalhos (seleção 2), eliminando os trabalhos que não abordavam especificamente a

utilização de produtos ou métodos de controle químico para a espécie. Na etapa seguinte (elegibilidade), foram selecionados os documentos que apresentaram conceitos, resultados e informações quali-quantitativas dos produtos utilizados no controle do *L. fortunei*.

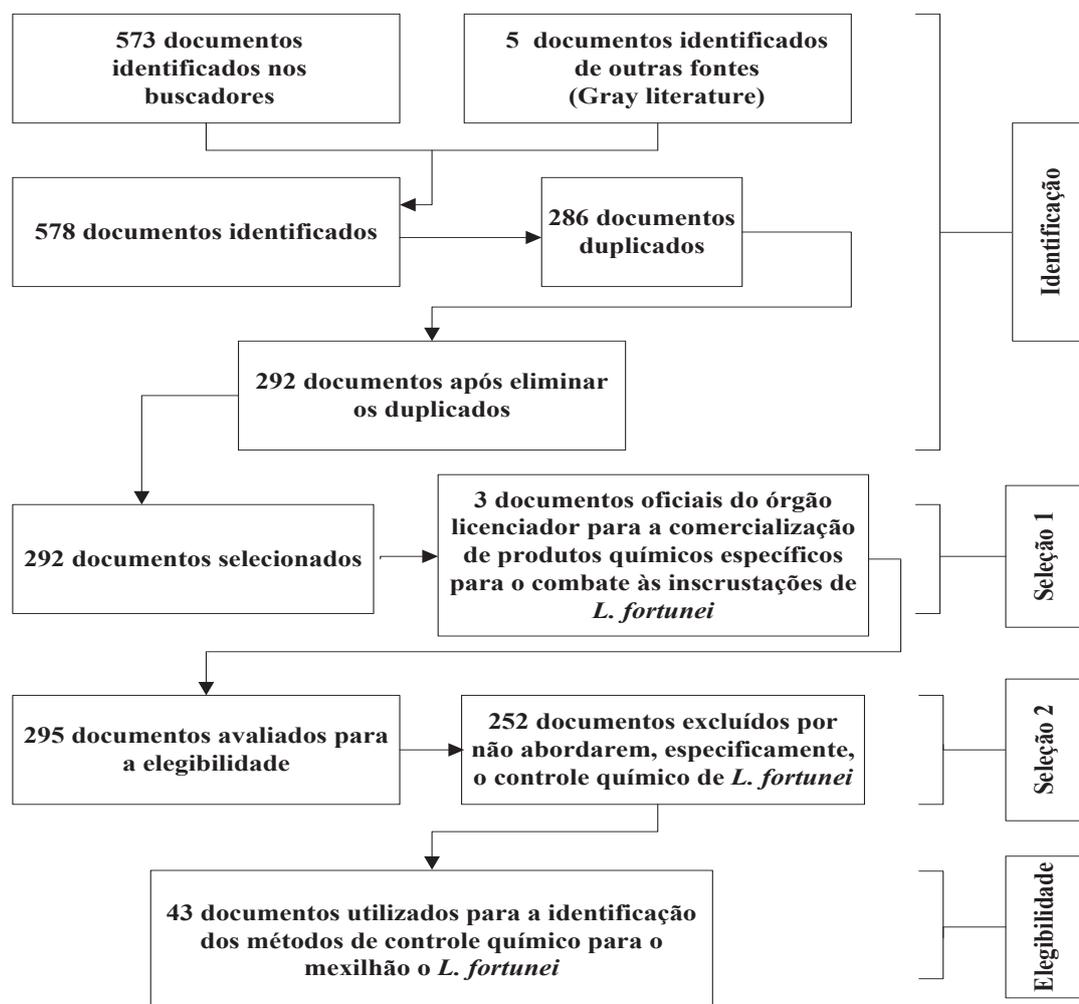


Figura 1.1. Síntese da metodologia prisma aplicada na seleção dos documentos para identificação e avaliação de métodos de controle químico para o combate de incrustações do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei*.

Após a identificação dos produtos químicos, foi realizada uma avaliação comparativa quanto aos potenciais impactos ambientais e operacionais que a espécie pode causar ao setor elétrico (aqui classificados como impactos negativos) e quanto ao seu grau de eficiência para prevenir, reduzir ou eliminar as bioincrustações (classificado como impacto positivo).

Os impactos foram classificados em uma escala variando de 0 a -3 (impactos negativos) e de 0 a +3 (impactos positivos), sendo que 0 corresponde a um impacto nulo, -1 e +1 corresponde a impactos de magnitude baixa; -2 e +2 corresponde a impactos de magnitude média, e -3 e +3 a impactos de mais alto grau de magnitude.

No entanto, como o número de fatores negativos analisados ($n = 15$) foi maior que o número de fatores positivos ($n = 6$) e para que fosse dado o mesmo peso matemático ao conjunto de impactos positivos e negativos, os dados obtidos foram matematicamente transformados a partir do uso das equações 1 (impactos negativos) e 2 (impactos positivos):

Transformação dos impactos negativos

$$I_{\text{negativo}} = \frac{\sum(IA+IO) \times IP}{IT} \quad (1)$$

Transformação dos impactos positivos

$$I_{\text{positivo}} = \frac{IE \times IN}{IT} \quad (2)$$

Sendo:

IA: Subtotal de impactos ambientais;

IO: Subtotal de impactos operacionais;

IE: Subtotal de impactos eficiência;

IP: Número de impactos positivos;

IN: Número de impactos negativos;

IT: Número de impactos totais;

O conjunto geral de impactos negativos e positivos gerados foi agrupado, através de uma análise de Cluster, utilizando o método de Ward a partir da distância completa de ligação e de acordo com o percentual de desagregação dos dados. Já o resultado final (RFA) da análise de cada produto químico foi então calculado pelo somatório dos impactos negativos e positivos transformados (equação 3):

$$RFA = I_{\text{negativo}} + I_{\text{positivo}} \quad (3)$$

Sendo:

RFA: Resultado Final Agrupado

1.3 RESULTADOS

A identificação dos produtos e compostos analisados, bem como suas principais características são apresentados de forma sumarizada na (Tabela 1.1). Já na (Tabela 1.2) são apresentados os resultados da análise comparativas entre os impactos positivos e negativos atribuídos a cada um desses produtos e compostos químicos.

Tabela 1.1. Principais compostos e produtos químicos utilizados no controle do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
Gás Amônia (CAS ¹ 7664-41-7)	Reduz o tempo em que as valvas do mexilhão são mantidas abertas para a respiração e filtração; prejudica a secreção do bisso; reduz a ação ciliar e provoca alterações metabólicas.	Provoca impactos ecotoxicológicos diretos e indiretos nas comunidades aquáticas. O gás difunde-se facilmente pelas membranas celulares, causando efeitos tóxicos, mesmo em baixas concentrações.	<p>Podem ser sufocante e causar queimaduras nos olhos e pele; provocar irritação na garganta e no trato respiratório; pode ser fatal em altas concentrações mesmo após curtos períodos de exposição. A amônia, na água de sistemas industriais, pode causar corrosão em ligas de cobre e zinco.</p>	Zagonel (2011), Montresor, Miranda-Filho et al. (2013), Montresor (2015)
BAYLUSCIDE WP70 [®] (CAS 50-65-7)	Produto a base de niclosamida, com ação moluscicida, usado inicialmente no controle de gastrópodes.	Produto com baixa ação residual, pois sofre hidrólise e fotólise. Pode ainda ser degradado por ação microbiana. Não há registros de impactos sobre ecossistemas aquáticos.	Não foram encontrados registros sobre a ocorrência ou não de impactos operacionais.	Dawson (2003); Cataldo, Boltovskoy et al. (2003); Silva (2013), Claudi e de Oliveira (2015); Newton, Boogaard et al. (2017)
BULAB 6002 [®] (CAS 31512-74-0)	Microbiocida catiónico a base de amônia quaternária, solúvel em água, utilizado no	Biocida de ação tóxica não seletiva. O produto se liga às superfícies carregadas	Produto estável em condições normais de uso e armazenamento. Não foram encontrados,	Waller, Rach et al. (1993); Martin, Mackie et al. (1993); McMahon, Shipman et

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
	<p>controle de algas, bactérias e moluscos em sistemas hidráulicos. Ação tóxica letal em larvas de mexilhão assim que há o contato com o produto. Provoca a desagregação dos indivíduos adultos em colônias incrustantes.</p>	<p>negativamente, incluindo microorganismos.</p>	<p>na literatura, dados científicos que indiquem danos às estruturas hidráulicas.</p>	<p>al. (1993); Darrigran, Maroñas et al. (2001); Martin, Mackie et al. (1992), Maroñas e Damborenea (2009)</p>
<p>CLAM-TROL CT-2™ (EPA² 3876-149)</p>	<p>Composto nitrogenado, a base de amônia quaternária, utilizado no controle de moluscos, hidrozoários, briozoários, insetos, fungos, bactérias, algas e incrustações por lodo em sistemas hidráulicos.</p>	<p>Biocida de ação tóxica para ictiofauna, não devendo ser lançado no corpo hídrico.</p>	<p>Produto oxidante, que provoca corrosões em ligas metálicas de alumínio, zinco e cobre. Exige o armazenamento em bombonas de aço inox 316. Corrosivo, pode causar danos irreversíveis aos olhos e provocar queimaduras na pele. Não deve ser usado ou armazenado perto de calor ou chama. Tem como produtos de sua decomposição óxidos de carbono e nitrogênio e cloreto de hidrogênio.</p>	<p>Boltovskoy e Cataldo (2003); Cataldo, Boltovskoy et al. (2003); Boltovskoy, Correa et al. (2006); Claudi e de Oliveira (2015)</p>

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
Gás cloro (CAS 7782-50-5)	Controle da formação do “ <i>biofouling</i> ”. Inibição do assentamento e crescimento dos estágios larvais do <i>L. fortunei</i> . Sua presença compromete o mecanismo de fixação dos organismos ao substrato.	Muito tóxico para organismos aquáticos, mesmo em baixas concentrações. Em ambientes lênticos, quando associados à matéria orgânica, gera subprodutos reconhecidamente carcinogênicos.	Risco de incêndio e explosão pela evaporação do gás em ambientes fechados. Produto químico altamente oxidante, ocasiona corrosão em sistemas hidráulicos formados por ligas metálicas. Há risco de morte ao manipulador se inalado.	Maclsaac (1994); Ricciardi (1998); Ribeiro (2001); Cataldo, Boltovskoy et al. (2002); Colares, Suminski et al. (2002); Cepero (2004); Giordani, Neves et al. (2005); Maroñas e Damborenea (2006); Campos (2009); Brentano (2014), Gupta (2015), Kumari, Gupta et al. (2015)
Dicloroisocianurato de sódio (CAS 2893-78-9)	Produto oxidante a base de cloro orgânico, apresentado na forma granulada ou pastilhas. Tem ação semelhante ao gás cloro na desinfecção e na ação moluscicida. Na água, o cloro presente dicloroisocianurato de sódio é disponibilizado mais lentamente que o gás cloro	Constitui em ameaça aos ambientes aquáticos, porém menos prejudicial que o gás cloro e que o hipoclorito de sódio (NaOCl). Possui reatividade com compostos orgânicos gerando subprodutos potencialmente prejudiciais à saúde humana. Atua nos diferentes níveis tróficos dos sistemas aquáticos, com a pele pode causar fortes irritações e/ou queimaduras. Baixo	Risco de incêndio e explosão se entrar em contato com materiais combustíveis. Em contato com ácidos libera gás tóxico. É irritante aos olhos e sistema respiratório; considerado altamente tóxico quando inalado. Há risco de morte se ingerido. Em contato com a pele pode causar fortes irritações e/ou queimaduras. Baixo	Kotiaho, Wood et al. (1992), EPA (1999), Rajagopal, van der Velde et al. (2002), Cataldo, Boltovskoy et al. (2003), Rajagopal, Van der Velde et al. (2003), Gupta (2015), Kumari, Gupta et al. (2015)

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
		no entanto não é bioacumulável.	custo financeiro. Provoca corrosão em equipamentos e estruturas metálicas	
		Por ser revestidas de gorduras, açúcares e proteínas, essas microcápsulas podem ser absorvidas por qualquer outro animal. Os compostos liberados são potencialmente bioacumuláveis nos organismos e transferidos para níveis superiores da cadeia trófica.	O contato prolongado com o produto pode causar irritação na pele e lesões oculares. Não há evidências na literatura sobre ação mutagênica e carcinogênica em seres humanos, mas há evidências de que isso ocorre em animais experimentais. Não há informações sobre eventuais impactos relacionado às estruturas hidráulicas.	Aldridge, Elliott et al. (2006), Maroñas e Damborenea (2006), Campos (2009), Costa, Aldridge et al. (2011), Li, Liang et al. (2015)
Dióxido de titânio (TiO ₂) (CAS 13463-67-7)	Microcápsulas com partículas ativas que reagem no interior dos mexilhões, liberando compostos tóxicos aos mesmos.			
		Age sobre as interações intermoleculares do metabolismo celular, provocando sua ruptura e dissociação das bicamadas lipídicas. Reduz a permeabilidade das membranas celulares	Por ser um produto composto por amônia quaternária, em altas concentrações tem ação corrosiva, podendo provocar queimaduras na pele e lesões nos olhos. Pode se decompor em	Boltovskoy e Cataldo (2003); Claudi e de Oliveira (2015)
H-130M (CAS 80-05-7)	Produto utilizado nos processos de desinfecção da água, agindo como um biocida.			

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
Hidróxido de Sódio (50%) (CAS 1310-73-2)	<p>Ocasiona uma rápida elevação do pH do meio e também da hemolinfa de organismos aquáticos. É utilizado para reduzir as incrustações por moluscos e hidrozoários e para provocar a desincrustação de lama ferruginosa nos sistemas hidráulicos.</p>	<p>causada pelos óxidos de nitrogênio, o que impede as trocas gasosas de organismos clorofilados e prejudica a realização da fotossíntese.</p>	<p>subprodutos como: óxidos de carbono, óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre e óxidos de fósforo. A transformação desses óxidos em ácidos fracos e fortes pode afetar as estruturas metálicas das tubulações e sistemas hidráulicos.</p>	<p>Boltovskoy, Correa et al. (2006); Darrigran e Damborenea (2009); Netto (2012); Montresor, Miranda-Filho et al. (2013); de Resende (2014)</p>
			<p>O produto pode provocar queimaduras graves na pele e nos olhos do manipulador. Provoca corrosão do aço, mas apenas em temperaturas acima de 40 °C. Se exposto ao ambiente de trabalho, pode absorver gás carbônico, produzindo carbonato de sódio. Em contato com metais como o Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Estanho (Sn), Zinco (Zn), bem como superfícies</p>	

Método de controle	Ação	Impactos ambientais	Impactos operacionais	Referências
MXD-100® (CAS 7173-51-5 e 124046-05-5)	Princípio ativo a base de tanino e amônia quaternária. Cria uma barreira contra a deposição de lama ferruginosa nas tubulações com ação antifouling e, em elevada concentração, é tóxico aos mexilhões.	Produto comercial cujos riscos e impactos ao ambiente natural ainda não foram adequadamente estudados ou descritos cientificamente, porém é classificado como produto altamente perigoso ao meio ambiente.	galvanizadas, pode gerar gases de hidrogênio, formando misturas explosivas em presença de ar. Classificação toxicológica do tipo Classe I – extremamente tóxico; ação corrosiva, podendo provocar queimaduras na pele e nos olhos pela presença de cloreto de didicildimetilamônio.	Pérez, García et al. (2007); Mäder Netto (2012); Montresor, Miranda-Filho et al. (2013);
Sulfato de cobre (CAS 7758-98-7)	Fungicida, algicida, herbicida e moluscicida potente, que inibe as atividades enzimáticas, provocando alterações teciduais e aumentando a permeabilidade das células.	O cobre presente nesse composto é altamente bioacumulável. Pode provocar efeitos letais e subletais, ocasionando mutações celulares. Por apresentar efeito fungicida, herbicida e inseticida, pode afetar as populações de macroinvertebrados no meio aquático natural.	Irritante para pele e olhos. Nocivo ao operador se ingerido. Não ocasiona corrosões em instalações hidráulicas.	Soares, Pereira et al. (2009); Mansur, Santos et al. (2012)

¹Chemical Abstract Service (CAS); ²Environmental Protection Agency (EPA).

Tabela 1.2. Classificação dos produtos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas de acordo com seus impactos operacionais e ambientais (impactos negativos) e sua eficiência (impactos positivos) comparativa.

Impactos	Fator	Gás Amônia	BAYLUS CIDE WP70	BULAB 6002®	CLAM-TROL CT-2™	Gás Cloro	Dicloroiso cianurato de sódio	H-130M	Hidróxido de sódio	Dióxido de Titânio	MXD-100	Sulfato de cobre	
(-) Operacionais	Risco à saúde humana	-3	-1	-2	-2	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-2	
	Condições de armazenamento	-3	-2	-1	-2	-3	-2	-1	-2	-1	-1	-1	
	Volume armazenado/utilizado	-3	-2	-2	-2	-3	-1	-2	-2	-1	-2	-1	
	Geração de gases tóxicos	-3	0	0	0	-3	-2	0	0	0	0	0	
	Risco de explosão	-2	0	0	0	-3	-2	0	-2	0	0	0	
	Manipulação/aplicação	-3	-2	-2	-2	-3	-2	-2	-3	-2	-1	-1	
	Reatividade	-1	-3	-1	-2	-3	-3	-2	-2	0	0	-1	-1
	Corrosão estrutural	-2	-1	-1	-1	-3	-3	-2	-1	0	0	-1	0
	Subtotal - Operacional	-20	-11	-9	-11	-24	-18	-11	-14	-6	-7	-6	
	(-) Ambientais	Características residuais	-1	0	-1	-1	0	0	-1	0	-3	-1	-3
Geração de subprodutos		-2	0	0	0	-3	-3	-1	0	-1	0	0	
Bioacumulação		0	0	0	0	0	0	0	0	-3	0	-3	
Seletividade no fitoplâncton		-1	-2	-2	-3	-3	-3	-2	-3	0	-3	-3	
Seletividade em macrófitas		0	-2	-1	-1	-3	-3	-1	-1	0	-2	-3	
Seletividade na fauna aquática		-3	-2	-2	-2	-3	-3	-2	-3	-2	-2	-2	

O que se observa é que, em maior ou menor grau, todos os produtos químicos avaliados apresentam algum tipo de risco ou problema operacional e/ou ambiental relacionado ao seu uso. O gás cloro foi o produto que apresentou a pior avaliação em relação aos riscos operacionais associados, seguido, em ordem decrescente, pelo gás amônia, hidróxido de sódio, CLAM-TROL CT-2™, H-130M, BAYLUSCIDE WP70®, BULAB 6002®, MXD-100, sulfato de cobre e dióxido de titânio. Em relação aos riscos ambientais, o sulfato de cobre, gás cloro e dicloroisocianurato de sódio atingiram os piores índices, enquanto o BAYLUSCIDE WP70®, BULAB 6002®, hidróxido de sódio e H-130M foram os que apresentaram os menores efeitos ambientais. Já em relação à eficiência, o produto que apresentou o melhor resultado foi o hidróxido de sódio, enquanto o dióxido de titânio foi aquele com o pior resultado.

Observou-se que os resultados se agruparam em três macro grupos: um composto pelo sulfato de cobre e pelo dióxido de titânio; outro pelos produtos à base de sais quaternários de amônia, ou seja, o Clam-Trol CT-2, H-130 M e Bumlab 6002, com maior relação entre si, mas, ainda assim, relacionados ao MXD-100 e ao Bayluscide WP70; e o último grupo, com menor relação entre os produtos, composto pelo hidróxido de sódio, dicloroisocianurato de sódio e gás amônia (Figura 1.2).

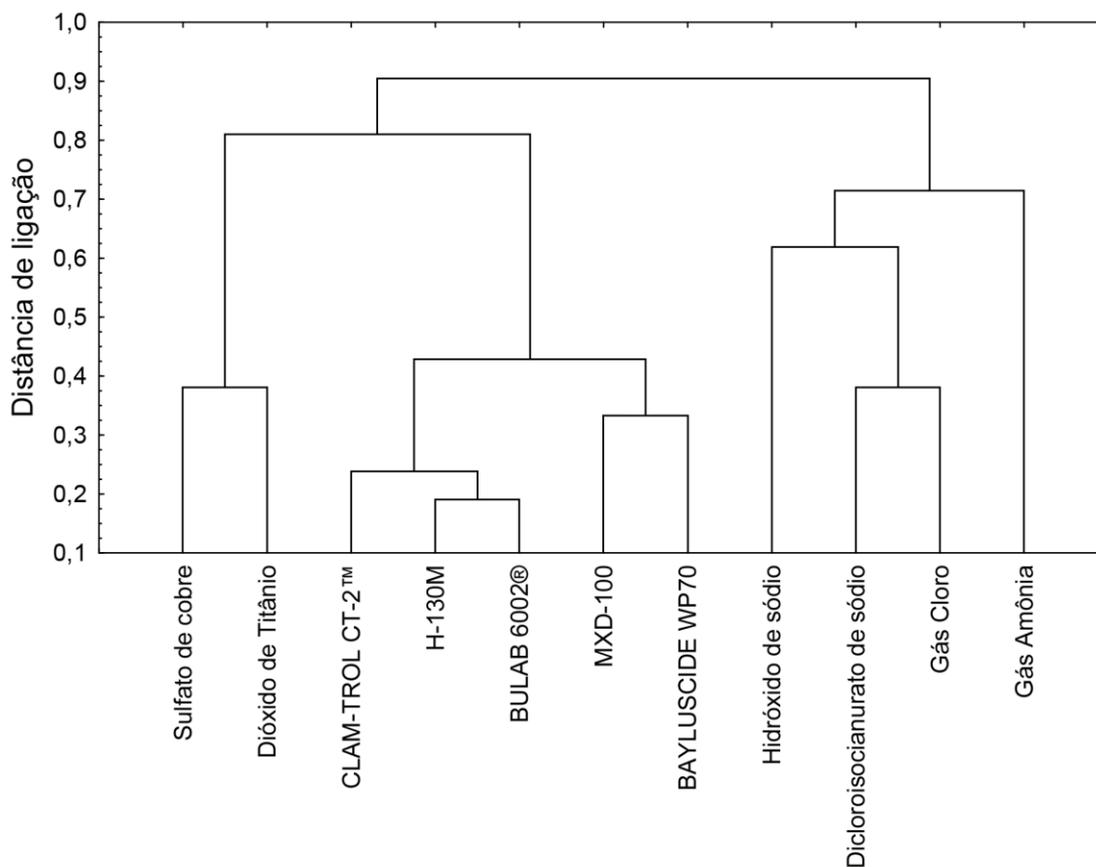


Figura 1.2. Agrupamento dos produtos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei* em estruturas hidráulicas, de acordo com seus impactos negativos (operacionais e ambientais) e positivos (eficiência).

O RFA, que basicamente considera o mesmo peso tanto para o conjunto de impactos positivos e negativos, mostra que o hidróxido de sódio foi o produto mais bem avaliado de todos, enquanto no outro extremo encontra-se o gás cloro. Dos 11 produtos/compostos avaliados oito apresentaram RFA > 0, ou seja, apresentaram um conjunto de impactos positivos maiores que os negativos no controle de incrustações causada por *L. fortunei* (Tabela 1.3).

Tabela 1.3. Resultado Final Agrupado do processo de avaliação dos produtos químicos utilizados no controle de *Limnoperna fortunei*.

Produto	Impactos		Resultado Final Agrupado
	Negativos	Positivos	
Hidróxido de sódio	-6,57	12,14	5,57
MXD-100®	-5,14	8,57	3,43

Produto	Impactos		Resultado Final Agrupado
	Negativos	Positivos	
BAYLUSCIDE WP70®	-5,43	7,86	2,43
BULAB 6002®	-4,86	7,14	2,29
H-130M	-5,71	7,86	2,14
Dicloroisocianurato de sódio	-9,43	11,43	2,00
CLAM-TROL CT-2™	-6,00	7,86	1,86
Sulfato de cobre	-6,29	6,43	0,14
Dióxido de Titânio	-4,57	4,29	-0,29
Gás amônia	-8,57	7,86	-0,71
Gás cloro	-11,14	9,29	-1,86

1.4 DISCUSSÃO

Os principais problemas geralmente associados ao uso de produtos químicos estão relacionados à sua estocagem e manipulação, às suas possíveis características corrosivas (Mäder Netto 2011) e aos resíduos e subprodutos gerados (Jenner, Taylor et al. 1997, Montresor 2015). Como geralmente são empregados em grandes quantidades (Costa, Aldridge et al. 2011), e como usualmente apresentam baixíssima ou nenhuma seletividade (Darrigran e Damborenea 2009), esses produtos químicos podem tanto provocar danos às próprias estruturas hidráulicas como ao ambiente (Kowalski e Kowalski 2008) e à saúde humana. Além disso, alguns desses biocidas não se degradam totalmente ou demoram muito para se degradar, podendo ainda se acumular em diferentes substratos, como verificado para os produtos dióxido de titânio e sulfato de cobre, contaminando águas superficiais e subterrâneas (Felix 2011) e até nos organismos.

Pela sua capacidade de eliminar agentes biológicos em qualquer nível trófico (Eppley, Renger et al. 1976), o cloro foi o método pioneiro empregado no controle de mexilhões e de outros organismos incrustantes na Europa, Ásia e na América do Norte (Claudi 1994, Jenner, Taylor et al. 1997, Jenner, Whitehouse et al. 1998). Contudo, subprodutos da decomposição podem ser formados durante o processo de desinfecção com o cloro, como cloroaminas, organoclorados, ácidos haloacéticos (HAA) e trihalometanos (THMs) (Jenner,

Taylor et al. 1997, Pianowski e Janissek 2003). Atualmente, as principais formas de cloro usadas tanto na desinfecção da água como para o controle de bioincrustações, são: o gás cloro, o hipoclorito de sódio, o hipoclorito de cálcio e o dicloroisocianurato.

O gás cloro, entretanto, apresentou o pior resultado, em termos de RFA, dentre todos os produtos analisados, atingindo valores negativos extremos em relação a praticamente todos os critérios analisados. O cloro, juntamente com a amônia, são os únicos produtos que, devido suas características químicas, geram gases tóxicos em condições normais de temperatura e pressão, independentemente de eventual reação com outros compostos, implicando em riscos diretos à saúde dos operadores. O produto apresenta ainda riscos de explosão e, quando utilizado na forma sólida, precisa ser acondicionado em ambiente livre de umidade. Em ambientes úmidos, por outro lado, pode reagir com outros elementos, o que compromete sua estabilidade química e sua eficiência (Paschoalato, Trimailovas et al. 2008).

O segundo pior resultado foi atribuído ao gás amônia. Ao mesmo tempo em que atua na eliminação das formas jovens e adultas do *L. fortunei*, o gás amônia apresenta alta toxicidade para os organismos aquáticos de uma forma geral (Camargo e Alonso 2006), sendo que os bivalves de água doce, segundo USEPA (2009), Montresor, Miranda-Filho et al. (2013) são os mais suscetíveis à sua ação tóxica, mesmo em baixas concentrações. Segundo Mummert, Neves et al. (2003), Montresor (2015), em condições laboratoriais, a amônia age sobre o tempo de abertura das valvas, nos processos de respiração e alimentação, na secreção dos fios de bisso e ainda afeta processos metabólicos de *L. fortunei*. Quanto ao aspecto operacional, a manipulação incorreta deste agente tóxico pode provocar lesões graves e, dependendo da concentração, ser até mesmo letal aos operadores. O armazenamento do produto deve ser feito em cilindros e esses devem permanecer estocados em áreas ventiladas, longe de fontes de calor, fogo ou nas proximidades de motores, instalações elétricas ou de quaisquer equipamentos que possam produzir faíscas, devido sua característica de inflamabilidade e de provocar explosão (Monteiro e Medani 2016). Aliada a essas características, o gás amônia, devido sua capacidade reativa, não pode ser armazenado juntamente com outros compostos oxidantes, como o cloro e

oxigênio, por exemplo. Tais fatores limitam sua aplicação em sistemas industriais e não recomendam, o seu uso em usinas hidrelétricas.

O dióxido de titânio, assim como o gás cloro e o gás amônia, alcançou RFA negativo. Esse agente químico é empregado como componente em tintas anti-incrustantes ou na forma de nanopartículas microencapsuladas (Shi, Magaye et al. 2013, Kulkarni, Mazare et al. 2015). As tintas, com dióxido de titânio são consideradas um método de baixa eficiência, por não agirem na eliminação dos indivíduos após sua incrustação. Há também um elevado custo operacional em sua utilização, pois para ser aplicado há a necessidade da desmontagem de instalações industriais. Além disso, o uso de tintas em estruturas hidráulicas externas, como grades da tomada de água, por exemplo, tem sua eficiência reduzida a partir do choque direto e sob pressão de galhos, troncos de árvores e lixo flutuante com essas grades. O atrito constante faz com que a tinta descasque e crie condições para que o *L. fortunei* se fixe.

Quando utilizado na forma de nanopartículas (TiO₂-NP), o dióxido de titânio apresenta genotoxicidade e causa alterações no metabolismo redox nas células de *L. fortunei* (Girardello 2016). Entretanto, o mesmo não tem ação eficiente sobre formas larvais da espécie, só agindo se for absorvido, diferentemente da maioria dos demais produtos que, além da sua absorção, agem a partir do contato externo com o organismo (Vale, Mehennaoui et al. 2016). A ação não seletiva do TiO₂-NP possibilita que seus efeitos se estendam por diferentes níveis tróficos, chegando até os organismos superiores por diferentes vias, como sistema respiratório, digestivo ou pele, circulando através do sangue e sistema linfático e atingindo diferentes órgãos (Hong, Ji et al. 2017). Assim, embora não haja relatos sobre efeitos do produto aos operadores e nem às estruturas hidráulicas, os impactos ambientais provocados pelo uso do dióxido de titânio precisam ainda ser melhor estudados e compreendidos (Czajka, Sawicki et al. 2015).

O sulfato de cobre é um pó de coloração verde acinzentada, inodoro e muito higroscópico. É um agente moluscicida usualmente utilizado no controle de gastrópodes terrestres (Amusan, Anyaele et al. 2002), além de ser aplicado também no controle do mexilhão-zebra *Dreissena polymorpha* (Waller, Rach et al. 1993). O cobre, apesar de ser um elemento presente naturalmente em

ambientes aquáticos e assimilável por diferentes organismos, em elevadas concentrações torna-se um agente tóxico para a grande maioria dos moluscos e para outros grupos de invertebrados (Ecotoxicol 2009).

Embora os critérios aqui analisados tenham levado a um RFA numericamente positivo, não se pode ignorar o fato do sulfato de cobre ser um produto químico com grande potencial de contaminação ambiental, sendo capaz, segundo Mansur, Santos et al. (2012), de ocasionar efeitos ecossistêmicos nefastos a longo prazo. De acordo com Soares, Pereira et al. (2009), o sulfato de cobre pode ocasionar lesões, mutações celulares e pode inibir as atividades enzimáticas, além de apresentar riscos de bioacumulação no ambiente. Para ser eficiente contra o mexilhão-dourado, precisa-se ser utilizado em elevadas concentrações (superiores a $2,16 \text{ mg L}^{-1}$ de CuSO_4) (Soares, Pereira et al. 2009). Ainda assim, o seu uso não é recomendado por órgãos ambientais como a US EPA (United States Environmental Protection Agency).

Quanto aos aspectos operacionais de manejo do sulfato de cobre, segundo a (ABTLP 2019), o produto apresenta características não combustíveis, devendo ser armazenado em embalagens bem fechadas, em local seco e limpo, sem necessidade de controle de temperatura. Caso seja inalado pode provocar irritação nas mucosas, tosse e dificuldade em respirar. O sulfato de cobre é tóxico por ingestão. O excesso de cobre solúvel no organismo humano, denominado de hipercupremia, pode provocar doenças como epilepsia, melanomas, artrite, reumatismo e doenças psiquiátricas (AZEVEDO, Cardoso et al. 2003).

O dicloroisocianurato de sódio corresponde à quarta geração de produtos a base de cloro. Neste caso, o cloro é utilizado em uma forma orgânica, o que lhe confere boa, mas não imediata solubilidade, facultando maior segurança e eficácia durante o uso, quando comparado aos produtos das gerações anteriores (gás cloro, hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio). Enquanto o gás cloro libera todo o seu potencial oxidativo por meio do ácido hipocloroso (HOCl), o dicloroisocianurato de sódio disponibiliza somente metade deste potencial, agindo por um período maior no ambiente (Clasen e Edmondson 2006). Por outro lado, o mecanismo oxidativo do dicloro é o mesmo do gás cloro, logo sua capacidade reativa e os subprodutos gerados pela sua decomposição são os

mesmos (Singer 1994). Assim, embora o dicloroisocianurato de sódio apresente vantagens operacionais e de custos financeiros em relação ao gás cloro, seus efeitos ambientais adversos são praticamente os mesmos do gás cloro.

Não muito diferente dos demais agentes químicos, os moluscidas comerciais a base de compostos quaternários de amônio, CLAM-TROL CT-2™, BULAB 6002® e o H-130M, testados por Darrigran, Colautti et al. (2007), também apresentaram problemas associados, como: dificuldades de uso em condições operacionais, custos elevados e também uma elevada toxicidade residual. Esses produtos exigem a aplicação de normas específicas para manipulação, o que acarreta em investimentos adicionais em treinamento e qualificação da equipe e na contratação de profissionais especializados. Por suas características oxidantes, demandam também o uso de estruturas e equipamentos específicos de armazenamento, como tonéis ou tanques de inox. Tais produtos funcionam por adsorção aos diferentes substratos presentes no sistema hidráulico, não sendo identificados pelos mexilhões como substâncias nocivas. Dessa forma, os mexilhões acabam mantendo suas valvas abertas, mesmo na presença de elevadas concentrações ambientais desses moluscidas, o que acarreta a uma ação mais rápida e efetiva dos mesmos (Sprecher e Getsinger 2000).

O Clam-trol CT2™ é eficaz tanto no controle de moluscos de ambientes dulcícolas como de ambientes marinhos agindo, também, no controle do crescimento de bactérias, fungos e algas (Waller, Rach et al. 1993). De acordo com o Guia de Controle Químico do mexilhão-zebra, proposto por Sprecher e Getsinger (2000), este produto, dependendo da sua concentração, pode ser tóxico para peixes e outros organismos aquáticos. Possui ação corrosiva, se em contato com a pele e os olhos e pode provocar lesões e ser tóxico se ingerido. Por apresentar etanol em sua composição, o Clam-trol CT2™ não deve ser armazenado perto de fontes de calor ou chamas, sob o risco de explosão.

O BULAB 6002® é um composto a base de amônio utilizado como algicida e microbicida em sistemas comerciais e industriais de tratamento e abastecimento de água (Claudi e de Oliveira 2015). Também é um moluscida e pode ser aplicado na prevenção à bioincrustação ocasionada por bivalves (McMahon e Lutey 1988, McMahon, Shipman et al. 1989, Waller, Rach et al. 1993). O BULAB 6002® demanda espaços relativamente grandes para seu

armazenamento, dificultando e encarecendo a logística de operação, além de apresentar custo unitário também elevado. De acordo com Boltovskoy e Cataldo (2003), o produto demonstra eficácia no controle do *L. fortunei*, porém não é seletivo e pode apresentar toxicidade aguda para outros organismos aquáticos, mesmo em concentrações letais menores que aquelas aplicadas no controle de *L. fortunei* (Sprecher e Getsinger 2000). Devido a sua lenta degradação, permanece por longos períodos no ambiente, acarretando em potenciais danos à fauna aquática, macrófitas e ao fitoplâncton (Darrigran, Maroñas et al. 2001, Boltovskoy e Cataldo 2003).

O H-130M consiste em um poliquaternário de amônio, não oxidante, sendo utilizado no controle das formas larvais (fase veliger), juvenis e adultas do mexilhão-zebra, *D. polymorpha*. Por ser um produto com característica surfactante, o H-130M atua na prevenção contra a incrustação de moluscos bivalves. Porém, para isso necessita de sistemáticas aplicações, podendo resultar em processos bioacumulativos em diferentes níveis tróficos (Waller, Rach et al. 1993). A US EPA estabelece um limite de quatro aplicações de H-130M por ano, sendo que cada tratamento não pode exceder 120 horas de aplicação (Sprecher e Getsinger 2000).

O Bayluscide WP70[®] (niclosamida) é um moluscicida utilizado principalmente no combate aos caramujos do gênero *Biomphalaria*, para controle da esquistossomose (Giovanelli, Silva et al. 2002). O produto afeta a respiração celular, pela inibição de absorção de oxigênio, e também o metabolismo de carboidratos, não sendo seletivo e podendo afetar outros organismos aquáticos, como os peixes (Perry e Lynn 2009). Semelhante ao que ocorre com produtos comerciais à base de quaternários de amônio, sua presença não é detectada pelos moluscos bivalves, que o assimilam rapidamente, o que o torna eficiente, não exigindo grandes períodos de exposição (Perepelizin 2011). Custos elevados e a necessidade de dissolver o produto antes do seu uso são fatores negativos associados. Além disso, esse produto contém 70% de niclosamida e alumínio em sua composição, o que o coloca como um produto tóxico de classe II, segundo EPA (1999).

O MXD-100 é um produto comercial, não-oxidante, composto por uma combinação de taninos e sais quaternários de amônio, contendo os seguintes

ingredientes ativos: cloreto de didecil dimetil amônio (DDAC – sigla em inglês de didecyl dimethyl ammonium chloride) e cloreto de dimetil isopropil benzil. Devido suas características reativas no ambiente, os produtos à base de sais quaternários de amônio utilizados como biocidas requerem regulamentações específicas, que devem definir os níveis máximos aceitáveis de contaminação no ambiente. O MXD-100® (IBAMA 2015) possui autorização especial para uso emergencial no Brasil, no entanto, o mesmo órgão regulamentador o classifica como um produto altamente tóxico (toxicidade classe I). Por outro lado, a eficiência do MXD-100® foi testada no controle de *L. fortunei* e os resultados obtidos foram considerados satisfatórios (Darrigran, Colautti et al. 2007, Mackie e Claudi 2009, Maroñas e Damborenea 2009).

Como regra geral, os moluscidas comercialmente utilizados apresentam alta toxicidade para *L. fortunei*, porém precisam ser ministrados de forma regular, por períodos longos e em elevadas concentrações, o que pode provocar interações negativas no ecossistema após sua passagem pelos sistemas hidráulicos. Muitos desses eventuais impactos ainda são desconhecidos e precisam ser melhor estudados. Nesse cenário, o NaOH acaba se destacando como uma alternativa menos impactante ao uso de produtos comerciais (LACTEC 2004, Mäder Netto 2011).

Quando o NaOH é injetado nas estruturas hidráulicas, os ácidos presentes no meio são ionizados, evitando a complexação do ferro e minimizando o processo de incrustação (LACTEC 2004). Produtos químicos alcalinos apresentam menores índices de corrosividade, conseqüentemente levam a um menor desgaste e depreciação de materiais e equipamentos hidráulicos (Segundo, Kosel et al. 1993). Sua ação sobre o *L. fortunei* e sobre demais organismos filtradores está relacionada à perda de homeostase. O NaOH aumenta o pH da hemolinfa, causando alterações bioquímicas e estruturais (Montresor 2015). Pode ainda danificar diretamente partes orgânicas do mexilhão, provocar alterações morfológicas e até a calcificação de fibras de colágeno (Karlsmark, Danielsen et al. 1988), o que leva a morte das formas larvais, juvenis e adultas da espécie.

Embora a variação do pH, produzida pela ação do hidróxido de sódio no ambiente aquático, possa ser letal a diferentes espécies de organismos

aquáticos, causando impactos indesejado a diferentes níveis tróficos (Boltovskoy, Correa et al. 2006, Darrigran e Mansur 2009), sua ação é basicamente limitada ao local de aplicação, pois o produto sofre rápida neutralização ambiental e não deixa efeitos residuais (TenEyek 2009). Quanto ao aspecto operacional, a manipulação do produto exige cautela, pois pode provocar queimaduras graves na pele e nos olhos do operador. Em contato com metais como o Alumínio (Al), Magnésio (Mg), Estanho (Sn), Zinco (Zn), bem como superfícies galvanizadas, pode gerar gases de hidrogênio, formando misturas explosivas em presença de ar (de Resende 2014).

1.5 CONCLUSÃO

Características como a não seletividade em relação à espécie-alvo; a geração de resíduos ou subprodutos tóxicos no ambiente; e uma série de indicadores de perigo operacionais e ambientais, representam um conjunto de fragilidades que limitam a eficiência ou adequação dos métodos químicos utilizados no controle de incrustações causadas por *L. fortunei* em sistemas hidráulicos. Com base nos fatores aqui avaliados de forma comparativa, o NaOH foi o composto que obteve a melhor avaliação entre todos os produtos e compostos analisados. Além de prevenir novas incrustações de mexilhões, o uso de NaOH reduz, com alta eficiência, a presença de organismos já incrustados. Embora apresente risco aos operadores, exigindo que a manipulação seja feita por profissionais treinados e capacitados, o NaOH, apresenta baixos riscos aos sistemas hidráulicos e aos ecossistemas aquáticos associados.

CAPÍTULO 2. TOXICIDADE DO DICLOROISOCIANURATO DE SÓDIO, HIDRÓXIDO DE SÓDIO, MXD-100 E DO FERBAX® CONTATO PARA O MEXILHÃO-DOURADO *LIMNOPERNA FORTUNEI* (DUNKER, 1857)

RESUMO

Métodos químicos de controle são os mais amplamente utilizados em todo o mundo no combate e na prevenção de incrustações causadas pelo mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas hidráulicos. Porém, as concentrações e as condições de operação são sempre fatores-chave para a obtenção de resultados satisfatórios. O objetivo deste estudo foi avaliar a toxicidade aguda de quatro produtos químicos (dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD-100 e Ferbax® Contato) utilizados ou potencialmente utilizados no controle de *L. fortunei*. O estudo foi direcionado ao cálculo dos seguintes indicadores de toxicidade de cada produto: concentração letal mediana (CL₅₀) e concentração letal 10% (CL₁₀). Os testes de toxicidade aguda foram realizados em condições laboratoriais controladas, envolveram o uso de sistemas semi-estáticos, utilizando 80 indivíduos por tratamento e tendo duração de exposição de 96 h. As CL₅₀ 96 h foram calculadas em: 2,01 mg.L⁻¹ para o dicloroisocianurato de sódio; 0,20 mL.L⁻¹ para o MXD-100; e 0,03 mL.L⁻¹ para o Ferbax® Contato. Além disso, estimou-se em 10,9 o pH necessário para provocar a morte de 50% dos organismos testados em 96 h. Os resultados aqui obtidos estabelecem, pela primeira vez, o grau de toxicidade do Ferbax® Contato, ao mesmo tempo que atestam ou ratificam o grau de toxicidade do dicloroisocianurato de sódio, do hidróxido de sódio e do MXD-100 para *L. fortunei*.

Palavras-chave: biocidas; controle químico; bioinvasão; incrustação.

2.1 INTRODUÇÃO

O mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) é uma espécie de molusco bivalve, nativa do sudeste asiático (Ricciardi 1998), que teve sua ocorrência registrada pela primeira vez na América do Sul, na bacia do rio da Prata, na Argentina no ano de 1991 (Darrigran e Pastorino 1993, Boltovskoy e Correa 2015); no Uruguai, em 1994; no Paraguai, em 1997; no Brasil e na Bolívia, no ano de 1998 (Darrigran e Damborenea 2005, Darrigran e Damborenea 2006, Boltovskoy e Correa 2015).

Sua introdução no continente americano ocorreu pelo despejo de água de lastro de grandes embarcações que chegavam do continente asiático (Pastorino, Darrigran et al. 1993, Darrigran e Pastorino 1995, Ricciardi 1998). Já o sucesso do processo de colonização e de dispersão da espécie em ambientes aquáticos continentais Sul-americanos tem relação com sua alta eficiência reprodutiva, levando à densidades larvais no plâncton de até 20.000 indivíduos/m³

(Boltovskoy e Cataldo 1999, Xu, Wang et al. 2015, Xia, Zhan et al. 2018); acelerada taxa de crescimento e comportamento gregário (Jenner, Whitehouse et al. 1998, Darrigran 2002, Santos, Mansur et al. 2008, Costa, Aldridge et al. 2011, Correa, Sardiña et al. 2015); capacidade de fixação aos mais diferentes substratos (Morton 1973, Huang, Li et al. 1981, Darrigran e Pastorino 1995, Boltovskoy e Cataldo 1999); além de ampla resistência a uma variedade de fatores ambientais.

Limnoperna fortunei destaca-se atualmente, não apenas na América do Sul, mas também no cenário mundial, como um organismo invasor, responsável por inúmeros impactos negativos em âmbito econômico (Darrigran e Ezcurra de Drago 2000, Darrigran e Damborenea 2005, Phillips, Darland et al. 2005, Boltovskoy, Karatayev et al. 2009, Boltovskoy e Correa 2015, Pizarro, Di Fiori et al. 2016), principalmente em função de ocasionar obstrução de estruturas hidráulicas usadas na captação de água e nos sistemas de resfriamento de usinas de geração de energia hidrelétrica (Perepelizin e Boltovskoy 2014, Morton 2015); de captação, tratamento e distribuição de água para consumo humano (Darrigran e Ezcurra de Drago 2000); de hidrovias (O'Neill Jr 1997); e até por causar entupimento de malhas de tanques-rede usados na piscicultura (Oliveira, Ayroza et al. 2014).

Entre os mecanismos utilizados para o controle de incrustação causadas por *L. fortunei* e por outros bivalves incrustantes no mundo, como é o caso do mexilhão-zebra *Dreissena polymorpha*, em estruturas hidráulicas, os métodos químicos destacam-se por serem aqueles mais ampla e frequentemente utilizados (Brugnoli e Clemente 2002, Cataldo, Boltovskoy et al. 2002, Matsui, Nagaya et al. 2002). Os principais agentes químicos utilizados na tentativa de controlar esses organismos incrustantes possuem substâncias ativas predominante a base de cloro, amônia, hidróxido de sódio, peróxido de hidrogênio ou sulfato de cobre em sua composição (Rajagopal, van der Velde et al. 2002, Mattos, Shiraishi et al. 2003).

Segundo Darrigran e Damborenea (2009), essas substâncias não são seletivas, sendo capazes de agir indistintamente sobre vários compartimentos dos ecossistemas aquáticos. Kowalski e Kowalski (2008) destacam ainda a possibilidade de muitos desses produtos agirem como agentes corrosivos das

próprias estruturas hidráulicas, podendo gerar subprodutos indesejáveis durante o processo de desinfecção, e, devido à sua toxicidade, oferecer riscos à saúde humana.

Dessa forma, para que os órgãos responsáveis possam deliberar sobre a utilização de qualquer um desses produtos químicos em sistemas hidráulicos abertos, ou seja, aqueles diretamente conectados ao ambiente, para controle de incrustações, há a necessidade de se conhecer e mensurar seus efeitos diretos sobre organismos-alvo, bem como definir adequadamente as concentrações a serem utilizadas (Claudi e de Oliveira 2015). Tal conhecimento é fundamental para minimizar os custos com a aplicação dos produtos e até evitar eventuais danos ambientais associados (Bertoletti, Gherardi-Goldstein et al. 1989, Claudi e de Oliveira 2015).

Uma das formas de se chegar à determinação das concentrações mais adequadas de produtos destinados ao controle de organismos indesejados envolve a realização de testes de toxicidade (Bertoletti, Gherardi-Goldstein et al. 1989, Chapman 2006, ABNT 2011, Calazans, Americo et al. 2013). O objetivo deste trabalho foi determinar a toxicidade aguda dos compostos químicos comerciais dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD100 e Ferbax® Contato, para *L. fortunei* em condições laboratoriais controladas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 OBTENÇÃO E MANUTENÇÃO DOS ORGANISMOS-TESTE

Exemplares de *L. fortunei* foram coletados em substratos fixos e incrustados sobre flutuadores que delimitam a área de risco da Usina Hidrelétrica Governador José Richa (25°32'36"S 53°29'48"W), Paraná, Brasil. As coletas foram realizadas manualmente e os indivíduos coletados foram acondicionados e transportados em recipientes com capacidade para 50 L, forrados com espuma umedecida, até o Laboratório de Pesquisas com Organismos Aquáticos (LAPOA), do Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos Ambientais (GIA), na Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Brasil (25°24'47.4"S 49°14'52.6"W).

No laboratório, os indivíduos foram mantidos em um tanque de polietileno com capacidade para 500 L, conectado externamente a filtros mecânicos e

biológicos. A temperatura da água foi ajustada a 25 °C, com o uso de um aquecedor de 300 watts Ht-8200 (BOYU, Taiwan). Diariamente, os animais foram alimentados com 10 g de pó de *Chlorella vulgaris*, previamente hidratado com água do próprio sistema.

Por medida sanitária e de biossegurança, todo o processo foi submetido a um rígido controle, evitando-se, assim, eventual risco de disseminação de indivíduos de *L. fortunei* através da rede pluvial ou do sistema de tratamento de água. Além disso, todo material como puçás, béqueres, bombas e aquecedores, após seu uso eram desinfetados com soluções de hipoclorito de sódio a 12%.

2.2.2 PRODUTOS TESTADOS

Testes de toxicidade aguda em condições laboratoriais foram realizados utilizando-se os seguintes produtos químicos: 1) dicloroisocianurato de sódio (HIDROAZUL – Grupo BAUMINAS, Brasil); 2) hidróxido de sódio (Dinâmica Química Contemporânea Ltda; Brasil); 3) MXD100 (Max Clean Ambiental & Química S/A, Brasil) ; 4) Ferbax® Contato (Clanox Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda; Brasil), cujas principais características e condições operacionais de uso no combate a *L. fortunei* em sistemas hidráulicos são apresentados na (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Produtos químicos utilizados nos testes de toxicidade aguda para *Limnoperna fortunei*, suas principais características e legislação de uso em sistemas hidráulicos no Brasil.

Composto/produto	Fabricante/País	Características	Legislação
Dicloroisocianurato de sódio (CAS 2893-78-9)	HIDROAZUL Grupo BAUMINAS, Brasil	É um composto orgânico, sólido, incolor, solúvel em água. Possui ação desinfetante. Embora tenha elevada capacidade de eliminar agentes patogênicos ou indesejáveis, como no caso de <i>L. fortunei</i> , apresenta atividade residual e pode causar oxidação das tubulações de sistemas hidráulicos. Os subprodutos gerados no processo de desinfecção, como cloroaminas, ácidos haloacéticos (HAA) e trihalometanos (THMs), representam riscos aos organismos aquáticos e à saúde humana.	IBAMA (2015)
Hidróxido de sódio (CAS 1310-73-2)	Dinâmica Química Contemporânea Ltda; Brasil	Em condição ambiente, é um sólido branco, bastante higroscópico. Caracteriza-se por ser uma base muito forte, portanto, é utilizada para neutralizar ácidos fortes ou para tornar rapidamente alcalino um meio reacional. Age produzindo aumento imediato do pH local, para	Não há legislação específica sobre o uso do produto para

Composto/produto	Fabricante/País	Características	Legislação
MXD100 (CAS 7173-51-5 e 124046-05-5)	MAX CLEAN AMBIENTAL & QUÍMICA S/A, Brasil	<p>provocando alterações estruturais, bioquímicas e fisiológicas nos organismos incrustantes. A <i>L. fortunei</i> no variação de pH causada pelo produto pode ser letal para diferentes espécies aquáticas.</p> <p>Produto comercial não oxidante, composto por uma combinação de taninos e sais quaternários de amônio, tendo em sua composição os seguintes ingredientes ativos: cloreto de didecil dimetil amônio e cloreto de dimetil isopropil benzil.</p> <p>Há evidências de que o produto não é identificado pelo <i>L. fortunei</i>, como substância nociva. Assim, os organismos manteriam sua atividade filtradora, permanecendo com as valvas abertas e facilitando a ação biocida do produto.</p>	<p>combate ao <i>L. fortunei</i> no Brasil.</p> <p>IBAMA (2015)</p>
Ferbax® Contato (CAS 7722-84-1)	Cianox Ind. E Comércio de Produtos Químicos Ltda; Brasil	<p>Produto utilizado como bactericida e no controle de incrustações biológicas em sistemas de água potável. Apresenta elevado poder oxidante sobre a matéria orgânica. É composto por solução aquosa de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) 48,3%,</p>	<p>Não há legislação específica sobre o uso do produto</p>

Composto/produto	Fabricante/País	Características	Legislação
		<p>umectantes, anticorrosivos e estabilizantes. O produto é classificado como líquido não inflamável, oxidante e corrosivo. É apresentado no estado líquido, tendo alta capacidade de dissolução em água. É rapidamente assimilado pelo ambiente, não apresentando ação residual.</p>	<p>para combate ao <i>L. fortunei</i> no Brasil.</p>

2.2.3 TESTES PRELIMINARES

2.2.3.1 Condições experimentais gerais

Exemplares adultos de *L. fortunei*, com aproximadamente 2,0 (\pm 0,2) cm de altura de concha, foram acondicionados em béqueres de vidro com volume individual útil de 2.000 mL ($n = 20$ indivíduos/béquer). Foram testadas cinco concentrações de cada produto, além de um grupo controle (sem nenhum composto químico) e um branco (béqueres contendo apenas a mesma água utilizada para o preparo das demais soluções-teste) para monitorar a possibilidade de contaminação entre as unidades experimentais. A sequência experimental padrão adotada é recomendada pela Environmental Protection Agency, EUA (EPA 2002) para medir a toxicidade aguda de organismos aquáticos. Nos testes definitivos, foram utilizados como limites superiores as menores concentrações testadas nos testes preliminares que causaram mortalidade de 100% dos organismos testados e, no outro extremo, as maiores concentração na qual não se observaram organismos mortos nos testes preliminares (Tabela 2.2). Todos os tratamentos foram realizados com 4 réplicas, totalizando 80 indivíduos/concentração.

Soluções-estoque de cada produto, foram previamente preparadas diluindo ou dissolvendo-os em água destilada. As soluções-teste foram preparadas a partir da diluição das soluções-estoque em água filtrada em filtros de poliéster 45 μ m; declorada com o uso de tiosulfato de sódio (50%) e reservada para uso durante todo o experimento.

Os béqueres foram mantidos em um sistema de banho termostático, com temperatura ajustada em 25 °C, com auxílio de dois aquecedores de 300 watts cada, controlados por um termostato digital (BOYU, Taiwan). Os animais permaneceram previamente por 24 horas em água declorada, antes de serem submetidos às soluções-teste. Esse período foi considerado como de aclimação às condições laboratoriais e foi importante para que houvesse tempo hábil para a fixação dos animais nas paredes laterais e no fundo dos béqueres.

Durante todo o período experimental (96 h), quando expostos às respectivas soluções-teste, os indivíduos eram submetidos à restrição alimentar,

evitando-se assim a liberação/degradação excessiva de metabólitos que pudessem comprometer a qualidade da água e mascarar os resultados da exposição aos produtos testados. Durante esse período, os mexilhões foram mantidos sob constante aeração, evitando-se a queda significativa das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) nas unidades experimentais. Diariamente, 100% do volume útil da solução contendo cada produto testado era trocado, mantendo-se as demais condições experimentais previamente estabelecidas.

Diariamente, os animais eram monitorados e quantificados para determinação das taxas de mortalidade. Os indivíduos mortos, identificados pela abertura das valvas e ausência de resposta ao toque, eram retirados dos béqueres e descartados.

2.2.3.2 Condições experimentais específicas

Alguns dos compostos químicos testados possuem especificidades quanto às suas características químicas e/ou dispõem de regulamentos específicos que determinam os requisitos operacionais para o seu uso no Brasil. Em função disso, algumas das condições experimentais precisaram ser ajustadas para se adaptarem a tais características e/ou regulamentos.

A metodologia do experimento de exposição dos mexilhões ao dicloroisocianurato de sódio foi ajustada ao que determina o Anexo II da Instrução Normativa N° 18 (IBAMA 2015), que regulamenta as condições e restrições de uso do produto. Neste caso, o tempo de exposição dos organismos-testes foi reduzido para duas horas/dia durante o período experimental de 96 horas. Devido à volatilidade do cloro, as unidades experimentais foram isoladas do meio externo com filme poliolefínico atóxico e tiveram sua aeração mecânica diminuída, mas ainda assim em volume suficiente para se evitar que as concentrações de oxigênio dissolvido na água caíssem abaixo de 4,0 mg.L⁻¹. Ainda, na busca de minimizar, dentro do possível, as variações nas concentrações de cloro durante o período de exposição, as soluções testes das unidades experimentais foram monitoradas e as concentrações de cloro foram corrigidas, quando necessárias, em a cada 15 minutos. A renovação do volume

útil das unidades experimentais foi feita nas mesmas condições gerais de experimentação.

Outra adaptação ocorreu no experimento de exposição dos animais ao hidróxido de sódio (NaOH). O pH das soluções-teste apresentava tendência de variação durante o experimento, em razão da ação tamponante da água e da presença de substâncias como o dióxido de carbono (CO₂), resultante de processos metabólicos dos organismos-testes. Para garantir uma variação mínima do pH nas soluções-teste, as unidades experimentais eram monitoradas individualmente a cada duas horas e o pH ajustado sempre que necessário. Os demais produtos foram testados segundo as condições experimentais gerais já descritas.

Tabela 2.2. Concentrações dos produtos químicos comerciais utilizadas na avaliação dos efeitos da exposição aguda de *Limnoperna fortunei*

Testes	Produto	Concentrações					
		C*	1	2	3	4	5
Preliminares	Dicloroisocianurato de sódio (mg.L ⁻¹)	0	0,01	0,1	1	10	100
	Hidróxido de sódio (pH)	7	8	9	10	11	12
	MXD100 (mL.L ⁻¹)	0	0,60	1,00	2,00	3,50	7,00
	Ferbax® Contato (mL.L ⁻¹)	0	0,01	0,02	0,04	0,08	0,20
Definitivos	Dicloroisocianurato de sódio (mg.L ⁻¹)	0	0,5	1,0	2,0	2,38	3,57
	Hidróxido de sódio (pH)	7	8	9	10	11	12
	MXD100 (mL.L ⁻¹)	0	0,01	0,05	0,10	0,50	1,00
	Ferbax® Contato (mL.L ⁻¹)	0	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08

*Controle

2.2.4 TESTES DEFINITIVOS

Os testes definitivos foram realizados nas mesmas condições experimentais já descritas anteriormente e sintetizadas na (Tabela 2.3). Os resultados obtidos foram empregados no cálculo dos seguintes indicadores de toxicidade: concentração letal 10% (CL₁₀) e concentração letal mediana (CL₅₀).

Tabela 2.3. Síntese das condições experimentais utilizadas nos testes preliminares e de definitivos de toxicidade aguda para *Limnoperna fortunei*.

Condição experimental	Produto			
	Dicloro-isocianurato de sódio	Hidróxido de sódio	MXD-100	Ferbax Contato
Nº de tratamentos	5	5	5	5
Nº Controle	1	1	1	1
Nº Branco	1	1	1	1
Nº Réplicas/tratamento	4	4	4	4
Nº de indivíduos em cada controle e tratamentos	20	20	20	20
Nº total de indivíduos no controle e em cada tratamento	80	80	80	80
Tempo diário de exposição ao princípio ativo	2 h	24 h	24 h	24 h
Período para correção das concentrações do produto	15 min	2 h	24 h	24 h
Período de experimentação	96 h	96 h	96 h	96 h
Taxa diária de renovação da solução-teste	800%	100%	100%	100%
Alimentação durante o experimento	Não	Não	Não	Não

2.2.5 QUALIDADE DA ÁGUA

A água de todas as unidades experimentais, tanto durante os experimentos preliminares como nos definitivos, e também aquela usada para a

reposição das soluções-teste, foi, a cada 24 h, monitorada em relação a alguns de seus principais parâmetros físicos e químicos. Imediatamente antes da troca das soluções-teste eram realizadas análises: da temperatura, com auxílio de um termômetro analógico BT2 (Jade, Brasil); pH, através de peagâmetro digital LAQUAtwin B-713 (Horiba, Japão); alcalinidade, mensurada por fotômetro multiparâmetro digital portátil Micro20 (Asko®, Suécia); oxigênio dissolvido (OD) e percentual de saturação de oxigênio (OD), por meio de oxímetro digital Pro20 (YSI®, EUA); concentração de nitrogênio na forma de amônia total [N-AT= $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$] obtida pelo método do indofenol (APHA. 2005) e nitrito (APHA 1995), seguido pela leitura das amostras em espectrofotômetro de bancada SpectraMax® M5 (Molecular Devices, EUA).

2.2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E TOXICOLÓGICAS

Um banco de dados foi gerado e organizado através do uso do software Excel® (Microsoft Office Professional Plus 2016). Os dados de qualidade da água e biométricos foram analisados para se checar sua normalidade, linearidade e homoscedasticidade, em seguida, foram analisados através do teste Tukey. Por meio de análise de regressão, com o uso da função probit, foi estabelecida relação entre a concentração de cada agente tóxico testado, o tempo de exposição e o efeito causado ao organismo teste. Deste modo, foi possível estimar a porcentagem de indivíduos mortos provocado pela exposição aguda ao agente tóxico, em diferentes combinações de concentração e tempo de exposição. Os parâmetros toxicológicos (CL_{10} , CL_{50}) foram estimados com o uso do software “Risk Assessment Tools Software e User's Guide” (Mayer, Ellersieck et al. 2010). Para a coleta, ordenação e sumarização dos dados e para análise e interpretação dos resultados dos experimentos, foi utilizado o software Statsoft StatisticaMR versão 12.0®.

2.3 RESULTADOS

Os resultados das análises físicas e químicas da água nas unidades experimentais durante os testes realizados estão discriminados na (Tabela 2.4). Não foram observadas diferenças estatísticas entre a água de reposição e a dos tratamentos em relação a amônia total e nitrito testados para cada produto individualmente. Dos parâmetros avaliados, a alcalinidade apresentou diferença

estatística ($p > 0,05$) entre a água de reposição e a das unidades experimentais no tratamento contendo hidróxido de sódio. O pH foi utilizado como indicador da ação deste agente químico, uma vez que o hidróxido de sódio reage com os íons carbonatos e bicarbonatos presentes no meio, provocando uma elevação nos valores de alcalinidade proporcionalmente ao aumento do pH testado. As concentrações de oxigênio dissolvido (OD) e a saturação de oxigênio (OS) apresentaram variação entre os tratamentos, com destaque para o produto Ferbax® Contato, que apresentou as menores concentrações (3,83 mg.L⁻¹ de OD e 72%, de OS).

Tabela 2.4. Parâmetros de qualidade da água monitorados durante a exposição aguda ao dicloroisocianurato de sódio, hidróxido de sódio, MXD100 e Ferbax® Contato em exemplares de *Limnoperna fortunei*.

Tratamento	Parâmetros monitorados						
	pH	Alcalinidade (mg L ⁻¹)	N-AT (mg L ⁻¹)	N-NO ₂ - (mg L ⁻¹)	OD (mg L ⁻¹)	OS (%)	
Reposição	7,45 (7,10-7,67)	22,00 ^{ab*} (18,00-78,00)	0,00 (0,00-0,00)	0,00 (0,00-0,00)	6,70 ^a (6,08-8,13)	94,95 ^a (83,00-102,90)	
Dicloroisocianurato de sódio	7,54 (7,25-7,75)	16,00 ^b (13,00-18,00)	0,01 (0,00-0,02)	0,02 (0,01-0,04)	4,59 ^b (3,99-5,56)	83,61 ^{ab} (42,15-93,71)	
Hidróxido de sódio	ND	76,00 ^a (42,00-78,00)	0,01 (0,01-0,02)	0,01 (0,01-0,04)	6,79 ^a (6,38-6,99)	92,90 ^a (87,00-96,40)	
MXD100	6,80 (5,49-7,16)	19,00 ^b (16,00-20,00)	0,01 (0,00-0,02)	0,00 (0,00-0,01)	5,21 ^b (5,02-5,42)	70,60 ^b (68,70-73,10)	
Ferbax® Contato	7,10 (6,70-7,51)	16,50 ^b (11,00-18,00)	0,01 (0,00-0,02)	0,01 (0,01-0,03)	3,83 ^b (3,52-5,75)	72,00 ^b (66,00-77,50)	
Controle	7,00 (6,54-7,54)	16,50 ^{ab} (12,00-48,00)	0,01 (0,00-0,01)	0,01 (0,01-0,04)	4,59 ^{ab} (4,16-6,89)	80,95 ^{ab} (45,80-96,20)	

*Valores apresentados como mediana (mínima e máxima). Letras indicam diferença estatística entre os tratamentos. ND (não disponível)

Na (Figura 2.1) estão apresentados os resultados, em termos de mortalidade acumulada dos mexilhões durante a exposição 96 h em cada tratamento testado. A taxa final de mortalidade do grupo controle, em todos os testes realizados, nunca foi superior a 8 indivíduos (ou seja, inferior a 10% dos indivíduos testados).

Uma característica em comum observada, foi que durante as primeiras 24 horas, os exemplares expostos a todos os tratamentos mantiveram suas conchas fechadas, impossibilitando atestar com segurança a morte ou não dos indivíduos. Após 48 horas de exposição, observou-se que os exemplares mortos inequivocamente apresentavam suas valvas abertas. Por isso, os valores calculados para cada um dos indicadores de toxicidade, bem como seu intervalo de confiança de 95% apresentados na (Tabela 2.5) foram calculados apenas para os períodos de 48, 72 e 96 h.

A concentração letal mediana (CL_{50}) obtida para o tratamento de exposição ao dicloroisocianurato de sódio, durante a exposição por 96 horas, foi de 2,10 mg.L⁻¹.

Durante as primeiras 48 horas de exposição ao tratamento com o hidróxido de sódio, somente valores de pH > 10 foram capazes de promover a mortalidade dos mexilhões. O valor máximo de pH testado (pH = 12), provocou 100% de mortalidade nas primeiras 48 horas de exposição, além de desincrustar todos os indivíduos que estavam fixados na parede de vidro das unidades experimentais. Não foram observadas diferenças significativas de mortalidade entre o controle e os tratamentos com pH 8,0 e 9,0 durante as 96 horas de exposição.

Concentrações de MXD-100 superiores a 1,0 mL.L⁻¹ foram capazes de causar 100% de mortalidade dos mexilhões após 72 horas de exposição ao produto. Concentrações de MXD-100 superiores a 0,5 mL.L⁻¹ apresentaram ação anti-incrustante para o mexilhão-dourado.

Todas as concentrações testadas de Ferbax® Contato, apresentaram efeitos tóxicos, resultando em mortalidade dos organismos-teste. A CL_{50} , para o período de exposição de 96 horas foi de 0,03 mL.L⁻¹. A menor concentração testada foi capaz de matar 10% dos mexilhões após um período de 48 h de exposição ao Ferbax® Contato.

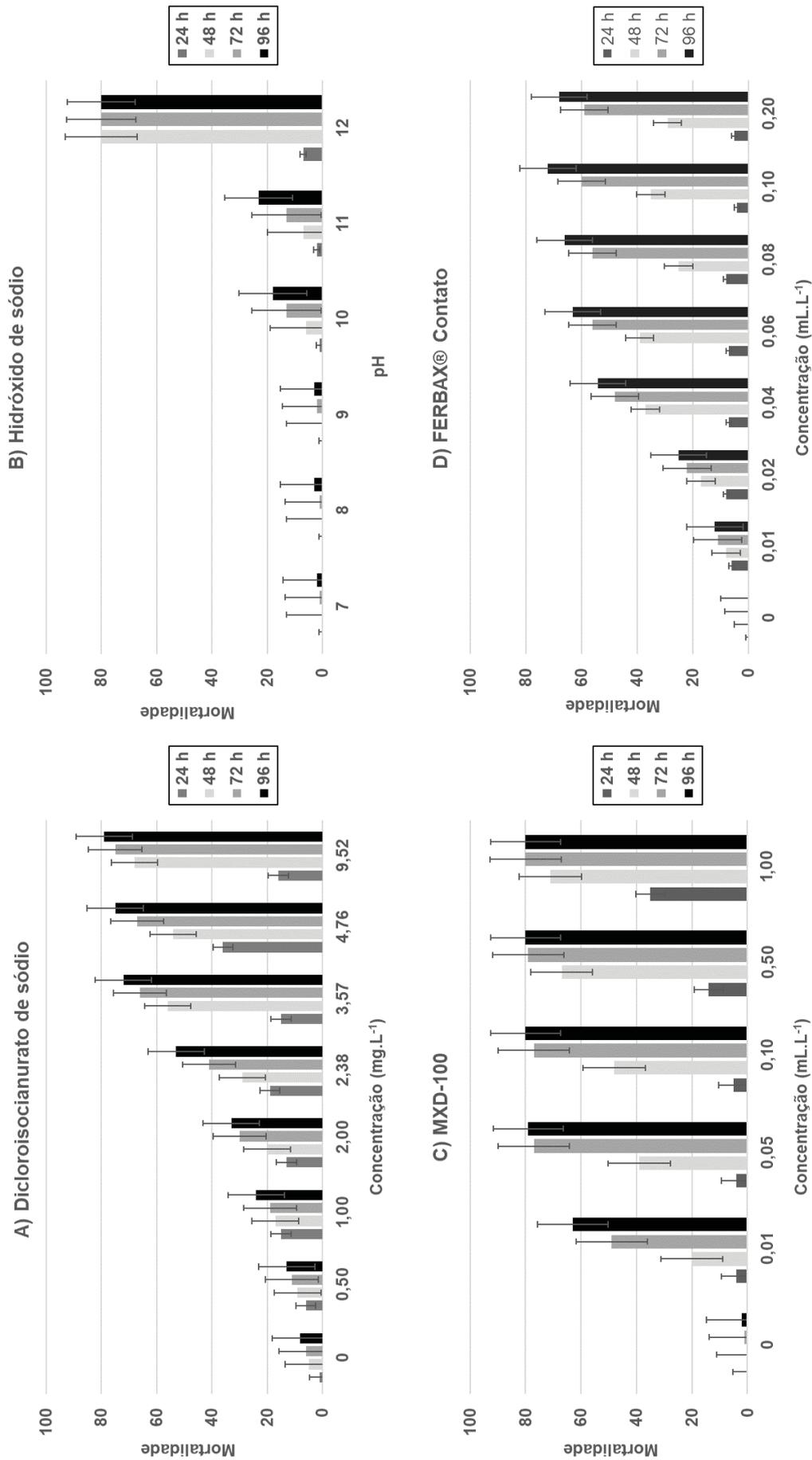


Figura 2.1. Mortalidade acumulada de *Limnoperna fortunei* expostos às diferentes concentrações do Dicloroisocianurato de sódio, Hidróxido de sódio, MXD-100® e Ferbax® Contato. As barras indicam o erro padrão.

Tabela 2.5. Indicadores de toxicidade calculados para diferentes produtos durante a exposição aguda de *Limnoperna fortunei* por 96 horas.

Produto	Tempo (h)	CL ₁₀	CL ₅₀
Dicloroisocianurato de sódio (mg.L ⁻¹)	48	0,60	3,96
	72	0,45	2,67
	96	0,34	2,01
Hidróxido de sódio (pH)	48	10,56	11,26
	72	9,66	11,10
	96	9,13	10,87
MXD-100 (mL.L ⁻¹)	48	0,12	1,59
	72	0,07	0,36
	96	0,04	0,20
Ferbax® Contato (mL.L ⁻¹)	48	0,01	0,23
	72	0,01	0,04
	96	0,01	0,03

2.4 DISCUSSÃO

Durante o período de 96 horas de exposição, os parâmetros físicos e químicos da água dos tratamentos não ultrapassaram os limites de tolerância estimados para *L. fortunei* por Darrigran, Damborenea et al. (2011), em um trabalho de revisão bibliográfica que avaliou os possíveis fatores ambientais que limitariam o processo de invasão do mexilhão-dourado em regiões neotropicais.

Observou-se que, sempre que submetidos a condições desfavoráveis, os mexilhões reagiram mantendo suas valvas fechadas pelo maior tempo possível. Tal reação também havia sido descrita por Cataldo, Boltovskoy et al. (2002), Mackie e Claudi (2009), Perepelizin (2011) e é interpretada como uma tentativa dos animais se protegerem da ação de compostos xenobióticos. Este comportamento de abertura e fechamento das valvas de *L. fortunei*, foi também constatado por Pizarro, Di Fiori et al. (2016), em um experimento em que os

autores expuseram o mexilhão-dourado ao glifosato, e por Montresor (2015), que avaliou o comportamento de indivíduos da espécie à exposição ao hidróxido de sódio (NaOH), cloreto de sódio (NaCl), dióxido de nitrogênio (NO₂), nitrato (NO₃), nitrogênio amoniacal (N-NH₃) e MXD-100. Comportamento semelhante apresentado por mexilhões também foi observado em estudos realizados por Mummert, Neves et al. (2003) e por Rajagopal, Van der Velde et al. (2003). Nas condições experimentais adotadas, esse comportamento dificultou enormemente a identificação de quais indivíduos estavam mortos ou não nas primeiras 24 h. Por isso, não foi possível calcular com precisão os indicadores de toxicidade para esse período inicial, independentemente do produto testado. Mas, a partir do momento em que os mexilhões precisavam abrir suas valvas para realizar as trocas gasosas, eles passavam a se expor diretamente à ação dos produtos químicos testados e ficava muito evidente quais indivíduos estavam vivos ou mortos.

Se considerado o horizonte de 96 h, observa-se que todos os produtos testados foram bastante eficientes quanto ao seu poder letal contra *L. fortunei*. Os resultados obtidos confirmam a vulnerabilidade do *L. fortunei* a produtos derivados do cloro, como já havia sido retratado em outros estudos (Mäder Netto 2011, Calazans, Godoy Fernandes et al. 2012, de Oliveira, Claudil et al. 2013, Freitas 2018). No entanto, como o cloro é um composto altamente volátil, os resultados obtidos apresentam relação direta e indissociável com a metodologia de exposição. Por exemplo, o presente estudo seguiu a metodologia operacional para uso do dicloroisocianurato de sódio em instalações hidráulicas de usinas hidrelétricas, determinada pelo IBAMA (2015). Segundo esse regulamento, produto deve ser aplicado por, no máximo, duas horas por dia. No experimento, as concentrações de cloro foram mantidas o mais constante possível durante este período, através de renovações sucessivas da solução-teste. Isso gerou uma CL₅₀ 48 h do dicloroisocianurato de sódio de 3,96 mg.L⁻¹. Campos (2009), em um experimento semi-estático, em que a solução-teste ficava em contato com os animais, sem qualquer ajuste ou controle das concentrações de cloro livre, por 24 h, estimaram a CL₅₀ 48 h do dicloroisocianurato de sódio em 108,96 mg.L⁻¹ (Campos 2009). No presente caso, a CL₅₀ 96 h do dicloroisocianurato de sódio foi calculada em 2,01 mg.L⁻¹ (ou 0,84 mg.L⁻¹ de cloro ativo), valor coerente

com o regulamentado pela Instrução Normativa 18 (IBAMA 2015), que determina a aplicação de uma concentração correspondente a $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de cloro ativo para o controle de *L. fortunei* em instalações hidráulicas de usinas hidrelétricas.

É amplamente documentado na literatura científica que o hidróxido de sódio pode ser uma importante ferramenta a ser usada no combate às incrustações biológicas, especialmente aquela provocadas por *L. fortunei* (Mäder Netto 2011, Claudi e de Oliveira 2015, Montresor 2015, Cordeiro, Andrade et al. 2017). No entanto, a ação tóxica do hidróxido de sódio ocorre exclusivamente em função da elevação do pH no ambiente, o que leva a alterações bioquímicas, estruturais e até à calcificação das fibras de colágeno dos mexilhões (Karlsmark, Danielsen et al. 1988, Montresor 2015). Assim, não há sentido em se analisar as concentrações letais ou efetivas do hidróxido de sódio, mas sim do pH sobre os organismos-teste.

Em relação ao hidróxido de sódio/pH há, mais uma vez, evidências de que as diferenças metodológicas entre os estudos e entre as formas de aplicação e controle do produto podem influenciar significativamente nos resultados obtidos. Devido à tendência de acidificação da água, em função da respiração dos animais e do efeito tampão da própria água, o experimento com hidróxido de sódio exigiu que os valores de pH fossem testados e corrigidos a cada duas horas, durante todo o experimento. Em condições operacionais aplicadas em sistemas hidráulicos industriais, a estabilidade do pH do hidróxido de sódio sofrerá ação não apenas desses fatores, mas também da concentração de material orgânico particulado ou dissolvido presente no meio (IFA 2016).

O teste de toxicidade aguda realizado com o NaOH demonstrou que em $\text{pH} \geq 12$ 100% dos mexilhões foram mortos após 48 horas de exposição. Montresor, Miranda-Filho et al. (2013), utilizando o método de fluxo contínuo, concluíram que o pH 11,5 mataria 50% dos indivíduos após 96 de exposição. No presente estudo, utilizando-se um método semi-estático, mas controlando o pH de cada solução-teste ao longo de todo o experimento, para que o efeito tampão da água não interferisse nos resultados, a morte de 50% dos indivíduos após 96 h de exposição aconteceu em pH 10,9. Estudos realizados por Mäder Netto (2011) demonstraram a capacidade de desincrustação de colônias de *L. fortunei* utilizando hidróxido de sódio em $\text{pH} \geq 9,0$. Porém, naquele caso, o autor

promoveu continuamente a injeção do hidróxido de sódio em um sistema experimental durante 12 meses, analisando mensalmente os resultados obtidos.

O MXD-100 foi classificado por Mäder Netto (2011) como um eficiente desincrustante de baixa ação residual. Montresor (2015) concluiu que o produto, à base de taninos e quaternários de amônia, é um agente químico de alto efeito tóxico para os mexilhões.

Nos ensaios laboratoriais realizados com o MXD-100, a CL_{50} 48 h foi calculada em 1,6 mL.L⁻¹. Na literatura, estudos de toxicidade com o mesmo produto apresentam valores de CL_{50} 48 h variando de 0,05 mg.L⁻¹ (Rolla e Mota 2010, Calazans, Americo et al. 2013) a 45,49 mg.L⁻¹ (Montresor, Miranda-Filho et al. 2013). Todos esses resultados atestam que o MXD-100 apresenta elevada toxicidade para *L. fortunei*. Mas, muito provavelmente, tal toxicidade também será estendida para outros organismos aquáticos presentes no sistema e no próprio ambiente. O MXD-100 possui autorização especial para uso emergencial no Brasil, no entanto, o órgão regulamentador o classifica como um produto altamente tóxico (toxicidade classe I) (IBAMA 2015), o que recomenda a realização de estudos complementares para se conhecer melhor os eventuais riscos ambientais associados ao uso do produto em larga escala.

O Ferbax® Contato ainda não foi utilizado em condições operacionais no controle de *L. fortunei*. O estudo aqui realizado é também o primeiro registro em literatura que demonstra resultados relativos à toxicidade desse produto para mexilhões-dourados em condições laboratoriais. No entanto, seu princípio ativo, o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), já foi avaliado anteriormente no controle de *D. polymorpha*. De acordo com Martin, Mackie et al. (1992) e Petrilie (2000), há a necessidade de se aplicar concentrações relativamente altas do composto em condições operacionais (entre 5,4 e 40 ppm) para que o mesmo atinja o nível de eficiência desejado. Mackie e Claudi (2009) concluíram que o peróxido de hidrogênio não seria uma opção economicamente viável para o controle do *D. polymorpha* em sistemas que envolvessem grandes volumes de água. No entanto, a elevada toxicidade do produto identificada no presente estudo (ilustrada através da CL_{50} 96 h de 0,03 ppm) indica que o Ferbax® Contato apresenta potencial para ser melhor avaliado para uso em condições operacionais em sistemas hidráulicos sujeitos à incrustação por *L. fortunei*.

CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho identificou e avaliou os principais os principais produtos químicos utilizados no controle da espécie invasora *Limnoperna fortunei*. Os dados obtidos sobre os impactos ambientais e operacionais associados aos produtos identificados, demonstraram um conjunto de fragilidades que limitam a eficiência destes métodos no controle da incrustação do *L. fortunei* em sistemas hidráulicos. Embora, mesmo sendo identificado limitações a nível operacional, o hidróxido de sódio (NaOH) foi o produto que apresentou melhores resultados quanto sua eficiência no controle das incrustações, além de oferecer menor risco aos sistemas hidráulicos e aos ecossistemas aquáticos.

Além disso, a partir de ensaios laboratoriais, foi possível avaliar a toxicidade dos produtos hidróxido de sódio e do dicloroisocianurato de sódio, utilizados para o controle de incrustação do *L. fortunei* em sistemas hidráulicos de usinas hidrelétricas brasileiras. Ainda, utilizando os mesmos procedimentos laboratoriais, foi demonstrado, pela primeira vez, os resultados do teste de toxicidade com o produto Ferbax® Contato, ainda não foi utilizado em condições operacionais no controle de *L. fortunei*. Os testes de toxicidade demonstraram que os três produtos avaliados se mostraram eficientes quanto ao seu poder letal contra o *L. fortunei*.

Assim, os resultados obtidos em relação aos impactos (negativos/positivos) e a vulnerabilidade do *L. fortunei* aos efeitos tóxicos dos agentes químicos testados, oferecem uma base de dados sobre as características dos principais produtos químicos, utilizados no controle do *L. fortunei*, permitindo avaliar a eficiência na resposta ao controle de incrustação, bem como, identificar as possíveis influências sobre os ecossistemas aquáticos.

BIBLIOGRAFIA

ABNT, A. B. d. N. T. (2011). "Aquatic ecotoxicology, acute toxicity, test with fish." NBR 15088: 22.

ABTLP. (2019). "Fispq – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos." Retrieved 01/02/2019, from <http://www.abtlp.org.br/index.php/quem-somos/associacao-brasileira-de-transporte-e-logistica-de-produtos-perigosos/>.

Aldridge, D. C., P. Elliott e G. D. Moggridge (2006). "Microencapsulated BioBullets for the control of biofouling zebra mussels." *Environmental science & technology* 40(3): 975-979.

Amusan, A., O. Anyaele e A. Lasisi (2002). "Effects of copper e lead on growth, feeding e mortality of terrestrial gastropod *Limnicolaria flammea* (Muller, 1774)." *African Journal of Biomedical Research* 5(1-2).

Andersen, M. C., H. Adams, B. Hope e M. Powell (2004). "Risk assessment for invasive species." *Risk analysis* 24(4): 787-793.

APHA (1995). *Standard methods for the examination of water e wastewater: 4500-NH3 Método fenol de determinação de Amônia Total*. Washington, DC, USA.

APHA., A. P. H. A. (2005). "Standard methods for the examination of water e wastewater. Method 4500 F. 4-114." 21.

Azevedo, S. M. d., M. d. G. Cardoso, N. E. Pereira, C. d. F. S. Ribeiro, V. d. F. Silva e F. d. C. AGUIAR (2003). "Levantamento da contaminação por cobre nas aguardentes de cana-de-açúcar produzidas em Minas Gerais." *Ciência e Agrotecnologia* 27(3): 618-624.

Belz, C. E. (2006). "Análise de risco de bioinvasão por *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857): um modelo para a bacia do Rio Iguaçu, Paraná."

Belz, C. E., W. A. P. Boeger, S. M. Alberti, L. Patella e R. T. Vianna (2005). "Prospecção do molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) em reservatórios e sistemas de usinas hidrelétricas da Companhia Paranaense de Energia–Copel." *Acta Biologica Leopoldensia* 27(2): 123-126.

Bergmann, C., M. Mansur, P. Bergonc, D. Pereira, C. Santos, T. Basegio, J. Vicenz e S. Santos (2010). "Selection of materials e coatings for the incrustation control of the golden mussel in the hydroelectric power station of Ibatinga (SP, Brazil)." *Matéria (Rio de Janeiro)* 15(1): 21-30.

Bertoletti, E., E. Gherardi-Goldstein, P. A. Zagatto e C. d. T. de Saneamento Ambiental (1989). "Variabilidade de testes de toxicidade com peixes." *Ambiente: revista CETESB de tecnologia* 3(1): 52-58.

Boltovskoy, D. e D. Cataldo (2003). "Estudios de evaluación, monitoreo y análisis de medidas de control de incrustaciones de moluscos bivalvos (*Limnoperna*

fortunei) en las instalaciones de la Central Hidroeléctrica Itaipu." Informe final de trabajos. Central Hidroeléctrica Itaipú. CHI: 1-281.

Boltovskoy, D. e D. H. Cataldo (1999). "Population dynamics of *Limnoperna fortunei*, an invasive fouling mollusc, in the lower Paraná River (Argentina)." *Biofouling* 14(3): 255-263.

Boltovskoy, D. e N. Correa (2015). "Ecosystem impacts of the invasive bivalve *Limnoperna fortunei* (golden mussel) in South America." *Hydrobiologia* 746(1): 81-95.

Boltovskoy, D., A. Karatayev, L. Burlakova, D. Cataldo, V. Karatayev, F. Sylvester e A. Marinelarena (2009). "Significant ecosystem-wide effects of the swiftly spreading invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei*." *Hydrobiologia* 636(1): 271-284.

Boltovskoy, D., N. Correa, D. Cataldo e F. Sylvester (2006). "Dispersion e ecological impact of the invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* in the Río de la Plata watershed and beyond." *Biological Invasions* 8(4): 947-963.

Brandt, R. A. (1974). *The non-marine aquatic Mollusca of Thailand*, Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft.

Brentano, A. M. (2014). "Controle de larvas de *Limnoperna fortunei* coletadas em ambiente natural com o uso de agente oxidante clorado."

Brugnoli, E. e J. Clemente (2002). "Los moluscos exóticos en la Cuenca del Plata: su potencial impacto ambiental y económico " Sección Limnología. Facultad de Ciencias. Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Calazans, S. H. C., J. A. Americo, F. da Costa Fernandes, D. C. Aldridge e M. de Freitas Rebelo (2013). "Assessment of toxicity of dissolved and microencapsulated biocides for control of the Golden Mussel *Limnoperna fortunei*." *Marine environmental research* 91: 104-108.

Calazans, S., L. Godoy Fernandes e F. Fernandes (2012). "Outros compostos." *Moluscos límnicos invasores no Brasil. Biologia, prevenção, controle*, Redes Editora, Porto Alegre: 311-315.

Callil, C. T. (2003). "Base de dados direcionada à elaboração de um programa de monitoramento de águas continentais utilizando moluscos bivalves."

Camargo, J. A. e Á. Alonso (2006). "Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment." *Environment international* 32(6): 831-849.

Campos, S. H. C. (2009). *Avaliação de biocidas dissolvidos e microencapsulados para o controle do mexilhão dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cataldo, D. H. e D. Boltovskoy (2000). "Yearly reproductive activity of *Limnoperna fortunei* (Bivalvia) as inferred from the occurrence of its larvae in the plankton of the lower Paraná river and the Río de la Plata estuary (Argentina)." *Aquatic Ecology* 34(3): 307-317.

Cataldo, D., D. Boltovskoy e M. Pose (2002). Control del molusco incrustante *Limnoperna fortunei* mediante el agregado de moluscicidas al agua. Tercera jornada sobre conservación de la fauna íctica en el río Uruguay. Paysandu, Uruguay.

Cataldo, D., D. Boltovskoy e M. Pose (2003). "Toxicity of chlorine and three nonoxidizing molluscicides to the pest mussel *Limnoperna fortunei*." *Journal (American Water Works Association)* 95(1): 66-78.

Cepero, E. (2004). "Control de *Limnoperna fortunei*: infestacion de plantas potabilizadoras de aguas." *Ingeniería sanitaria y ambiental (Buenos Aires)*(72): 50-52.

Chapman, P. M. (2006). "Emerging substances—emerging problems?" *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 25(6): 1445-1447.

Clasen, T. e P. Edmondson (2006). "Sodium dichloroisocyanurate (NaDCC) tablets as an alternative to sodium hypochlorite for the routine treatment of drinking water at the household level." *International journal of hygiene and environmental health* 209(2): 173-181.

Claudi, R. (1994). *Practical manual for zebra mussel monitoring and control* / Renata Claudi e Gerald L. Mackie. Boca Raton, Lewis Publishers.

Claudi, R. e M. D. de Oliveira (2015). *Alternative Strategies for Control of Golden Mussel (Limnoperna fortunei) in Industrial Facilities*. *Limnoperna Fortunei*, Springer: 463-476.

Colares, E., M. Suminski e M. Bendati (2002). "Diagnóstico e controle do mexilhão-dourado, *Limnoperna fortunei*, em sistemas de tratamento de água em Porto Alegre (RS, Brasil)." VI Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória (Brazil).

Cordeiro, N., J. Andrade, L. Montresor, D. Luz, J. Araújo, C. Martinez, J. Pinheiro e T. Vidigal (2017). "Physiological response of invasive mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)(Bivalvia: Mytilidae) submitted to transport and experimental conditions." *Brazilian Journal of Biology* 77(1): 191-198.

Correa, N., P. Sardiña, P. V. Perepelizin e D. Boltovskoy (2015). *Limnoperna fortunei* colonies: structure, distribution and dynamics. *Limnoperna fortunei*, Springer: 119-143.

Costa, R., D. C. Aldridge e G. D. Moggridge (2011). "Preparation and evaluation of biocide-loaded particles to control the biofouling zebra mussel, *Dreissena polymorpha*." *Chemical Engineering Research and Design* 89(11): 2322-2329.

- Costa, R., D. C. Aldridge e G. D. Moggridge (2011). "Preparation and evaluation of biocide-loaded particles to control the biofouling zebra mussel, *Dreissena polymorpha*." *Chemical Engineering Research e Design* 89(11): 2322-2329.
- Crooks, J. A., M. E. Soulé e O. Sandlund (1999). "Lag times in population explosions of invasive species: causes and implications." *Invasive species and biodiversity management*: 103-125.
- Czajka, M., K. Sawicki, K. Sikorska, S. Popek, M. Kruszewski e L. Kapka-Skrzypczak (2015). "Toxicity of titanium dioxide nanoparticles in central nervous system." *Toxicology in Vitro* 29(5): 1042-1052.
- Daehler, C. C. (2001). "Two ways to be an invader, but one is more suitable for ecology." *Bulletin of the Ecological Society of America* 82(1): 101-102.
- Darrigran, G. (1999). "Longitudinal distribution of molluscan communities in the Río de la Plata estuary as indicators of environmental conditions." *Malacological Review suppl. Freshwater Mollusca* 8: 1-12.
- Darrigran, G. (2002). "Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments." *Biological invasions* 4(1): 145-156.
- Darrigran, G. A., D. C. Colautti e M. E. Maroñas (2007). "A potential biocide for control of the golden mussel, *Limnoperna fortunei*."
- Darrigran, G. A., M. E. Maroñas e D. C. Colautti (2001). "Primeras estimaciones de concentraciones letales de un biocida para el molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Mytilidae)." *Seminario Internacional—Gestión Ambiental e Hidroelectricidad, Salto Grande*.
- Darrigran, G. e C. Damborenea (2005). "A South American bioinvasion case history: *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), the golden mussel." *American Malacological Bulletin* 20(1/2): 105.
- Darrigran, G. e C. Damborenea (2006). *Bio-invasión del mejillón dorado en el continente americano*, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Darrigran, G. e C. Damborenea (2009). "Introdução a biologia das invasões." *O Mexilhão Dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle*. Cubo Editora, Sao Carlos: 1-245.
- Darrigran, G. e G. Pastorino (1993). "Bivalvos invasores en el Río de la Plata, Argentina." *Comunicaciones de la Sociedad Malacológica del Uruguay* 7(64-65): 309-313.
- Darrigran, G. e G. Pastorino (1995). "The recent introduction of a freshwater Asiatic bivalve, *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) into South America." *Veliger* 38(2): 171-175.

Darrigran, G. e I. Ezcurra de Drago (2000). "Invasion of the exotic freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (DUNKER, 1857) (Bivalvia: Mytilidae) in South America. ." *The Nautilus* 114(2): 69-73.

Darrigran, G. e M. Mansur (2009). Introdução e dispersão do *Limnoperna fortunei*. Introdução a Biologia das Invasões. O Mexilhão Dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. Cubo Editora, São Carlos, SP.: 89–110. .

Darrigran, G., C. Damborenea, E. C. Drago, I. E. de Drago e A. Paira (2011). Environmental factors restrict the invasion process of *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) in the Neotropical region: A case study from the Andean tributaries. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, EDP Sciences.

Davis, M. A. e K. Thompson (2000). "Eight ways to be a colonizer; two ways to be an invader: a proposed nomenclature scheme for invasion ecology." *Bulletin of the ecological society of America* 81(3): 226-230.

Dawson, V. K. (2003). "Environmental fate and effects of the lampricide Bayluscide: a review." *Journal of Great Lakes Research* 29: 475-492.
del *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae)."

Drago, I. E., L. Montalto e O. B. Oliveros (2009). Desenvolvimento e ecologia larval do *Limnoperna fortunei*. O Mexilhão Dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle. G. Darrigran e C. Damborenea. 246 p. São Carlos – SP, Cubo Editora: 77-87.

Ecotoxicol, J. B. S. (2009). "Toxicidade do sulfato de cobre ao mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), em água bruta."

EPA (2002). "United States Environmental Protection Agency. Methods of measuring the acute toxicity of effluents and receiving eaters to freshwater and marine organisms."

EPA, U. S. E. P. A. (1999). "Prevention, Pesticides and Toxic Substances " EPA-738-F99-013: 9.

Eppley, R. W., E. H. Renger e P. M. Williams (1976). "Chlorine reactions with seawater constituents and the inhibition of photosynthesis of natural marine phytoplankton." *Estuarine and Coastal Marine Science* 4(2): 147-161.

Espínola, L. A. e H. Ferreira Júlio (2007). "Espécies invasoras: conceitos, modelos e atributos." *Interciencia* 32(9).

Felix, É. P. (2011). Avaliação de técnicas de controle da incrustação por mexilhão-dourado em hidrogeradores visando minimização da indisponibilidade, Universidade de São Paulo.

Ferreira, C. E. L., J. E. A. Gonçalves e R. Coutinho (2004). "Cascos de navios e plataformas como vetores na introdução de espécies exóticas." *Água de lastro e bioinvasão*: 143-155.

Filippo, R. d. (2003). "Mexilhão dourado nos ecossistemas brasileiros." SEPRONEWS: Série meio ambiente, ano 1: 1.

Franklin Junior, W., H. Matthews-Cascon, L. Bezerra, C. Meireles e M. Soares (2005). "Levantamento da macrofauna bentônica de ambientes consolidados (região entre-marés de praias rochosas)." Relatório Técnico Zoneamento Ecológico e Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará, SEMACE/FCPC/LABOMAR-UFC. Fortaleza.

Freitas, L. M. A. d. (2018). "Atividade moluscicida e interações moleculares da nitazoxanida com *Limnoperna fortunei*."

Ghabooli, S., A. Zhan, P. Sardiña, E. Paolucci, F. Sylvester, P. V. Perepelizin, E. Briski, M. E. Cristescu e H. J. Maclsaac (2013). "Genetic diversity in introduced golden mussel populations corresponds to vector activity." *PloS one* 8(3): e59328.

Giordani, S., P. Neves e C. Andreoli (2005). *Limnoperna fortunei* ou mexilhão dourado: impactos causados, métodos de controle passíveis de serem utilizados e a importância do controle de sua disseminação. 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Mato Grosso do Sul, Brasil.

Giovanelli, A., C. L. P. A. C. Silva, L. Medeiros e M. C. d. Vasconcellos (2002). "The molluscicidal activity of niclosamide (Bayluscide WP70®) on *Melanoides tuberculata* (Thiaridae), a snail associated with habitats of *Biomphalaria glabrata* (Planorbidae)." *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz* 97(5): 743-745.

Girardello, F. (2016). "Nanopartículas de dióxido de titânio e avaliação da sua toxicidade no mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*)."

Gupta, R. C. (2015). *Handbook of toxicology of chemical warfare agents*, Academic Press.

Heger, T. e L. Trepl (2003). "Predicting biological invasions." *Biological Invasions* 5(4): 313-321.

Hong, F., L. Ji, Y. Zhou e L. Wang (2017). "Pulmonary fibrosis of mice and its molecular mechanism following chronic inhaled exposure to TiO₂ nanoparticles." *Environmental toxicology*.

Huang, Z.-g., C. Li, L. Zhang, F. Li e C. Zheng (1981). "The distribution of fouling organisms in Changjiang river estuary." *Oceanologia et Limnologia Sinica* 12(6): 531-537.

IBAMA, I. B. d. M. A. e. d. R. H. (2015). "Certificado de registro de agrotóxico e afins para uso emergencial no controle do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* em sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas." *Diário Oficial da União*.

IFA. (2016). "Sodium hydroxide." *GESTIS Substance Database* Retrieved 18/12/2018, 2018.

Jenner, H. A., C. J. L. Taylor, M. van Donk e M. Khalanski (1997). "Chlorination by-products in chlorinated cooling water of some European coastal power stations." *Marine Environmental Research* 43(4): 279-293.

Jenner, H. A., J. W. Whitehouse, C. J. L. Taylor e M. Khalanski (1998). "Cooling water management in European power stations Biology and control of fouling." *Hydroécol. Appl.* 10: 1-225.

Johnson, L. E. e J. T. Carlton (1996). "Post-establishment spread in large-scale invasions: dispersal mechanisms of the zebra mussel *Dreissena polymorpha*." *Ecology* 77(6): 1686-1690.

Karlsmark, T., L. Danielsen, H. Thomsen, O. Aalund, K. Nielsen, O. Nielsen e I. Genefke (1988). "The effect of sodium hydroxide and hydrochloric acid on pig dermis. A light microscopic study." *Forensic science international* 39(3): 227-233.

Kimura, T. (1994). "The earliest record of *Limnoperna fortunei* (Dunker) from Japan." *Chiribotan* 25: 34-35.

Kolar, C. S. e D. M. Lodge (2001). "Progress in invasion biology: predicting invaders." *Trends in ecology & evolution* 16(4): 199-204.

Kot, M., M. A. Lewis e P. van den Driessche (1996). "Dispersal data and the spread of invading organisms." *Ecology* 77(7): 2027-2042.

Kotiaho, T., J. M. Wood, P. L. Wick Jr, L. E. Dejarne, A. Ranasinghe, R. G. Cooks e H. P. Ringhand (1992). "Time persistence of monochloramine in human saliva and stomach fluid." *Environmental science & technology* 26(2): 302-306.

Kowalski, E. L. e S. C. Kowalski (2008). "Revisão sobre métodos de controle do mexilhão dourado em tubulações." *Revista Produção Online* 8(2).

Kulkarni, M., A. Mazare, E. Gongadze, Š. Perutkova, V. Kralj-Iglič, I. Milošev, P. Schmuki, A. Iglič e M. Mozetič (2015). "Titanium nanostructures for biomedical applications." *Nanotechnology* 26(6): 062002.

Kumari, M., S. Gupta e B. Mishra (2015). "Multi-exposure cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in drinking water supplies—A case study of Eastern region of India." *Ecotoxicology and environmental safety* 113: 433-438.

LACTEC (2004). Estudos para controle da deposição de lama ferruginosa ("fouling") nos sistemas de resfriamento das usinas de Nova Ponte e Emborcação da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Relatório Final. Curitiba, PR, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

Leitão, F. H. d. M. (2011). "A educação na prevenção de bioinvasões: um estudo de caso para o mexilhão dourado-*Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)."

Li, F., Z. Liang, X. Zheng, W. Zhao, M. Wu e Z. Wang (2015). "Toxicity of nano-TiO₂ on algae and the site of reactive oxygen species production." *Aquatic Toxicology* 158: 1-13.

MacIsaac, H. (1994). "Practical manual for zebra mussel monitoring and control. R. Claudi e GL Mackie." *Journal-North American Benthological Society* 13: 411-411.

Mackie, G. L. e R. Claudi (2009). *Monitoring and control of macrofouling mollusks in fresh water systems*, CRC Press.

Mäder Netto, O. S. (2011). *Controle da incrustação de organismos invasores em materiais de sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas*. Dissertação, Universidade Federal do Paraná.

Mäder Netto, O. S. (2012). "Controle da incrustação de organismos invasores em materiais de sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas."

Mansur, M., C. Santos, D. Pereira, I. P. Paz, M. L. Zurita, M. R. Rodriguez, M. Nehrke e P. A. Bergonci (2012). "Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle." Porto Alegre: Redes Editora.

Mansur, M., L. Richinitti e C. d. SANTOS (1999). "Limnoperna fortunei (Dunker, 1857) molusco bivalve invasor na bacia do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil." *Biociências* 7(2): 147-149.

Maroñas, M. e C. Damborenea (2006). "Efecto de biocidas y tolerancia a la exposición al aire." *Bio-Invasión Del Mejillón Dorado En El Continente Americano*, La Plata: Edulp, La Plata, Argentina. Darrigran G e Damborenea C: 167-179.

Maroñas, M. E. e C. Damborenea (2009). "Efeito de biocidas e tolerância à exposição ao ar." *Introdução a Biologia das invasões. O Mexilhão Dourado na América do Sul: biologia, dispersão, impacto, prevenção e controle*. São Carlos: Cubo Editora: 169-183.

Martin, I., G. Mackie e M. Baker (1992). "Acute toxicity and pulse-dosed delayed mortality at 12 and 22 C with sodium hypochlorite, Bulab 6002 and hydrogen peroxide on the biofouling mollusk, *Dreissena polymorpha*." *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 24: 381-389.

Martin, M. D., G. L. Mackie e M. A. Baker (1993). "Control of the Biofouling Mollusc, *Dreissena polymorpha* (Bivalvia: Dreissenidae), with sodium hypochlorite and with polyquaternary ammonia and benzothiazole compounds." *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 24(3): 381-388.

Martinez, C. B., M. F. de Resende, C. M. G. Simeão e M. Libânio "XI-102-A Variação Das Características Hidráulicas Em Conduitos Forçados Devido A Infestação Pelo *Limnoperna fortunei*."

Matsui, Y., K. Nagaya, G. Funahashi, Y. Goto, A. Yuasa, H. Yamamoto, K. Ohkawa e Y. Magara (2002). "Effectiveness of antifouling coatings and water flow in controlling attachment of the nuisance mussel *Limnoperna fortunei* ." *Biofouling* 18(2): 137-148.

Mattos, I. L. d., K. A. Shiraishi, A. D. Braz e J. R. Fernandes (2003). "Peróxido de hidrogênio: importância e determinação." *Química nova*: 373-380.

McMahon, R. e R. Lutey (1988). Field and laboratory studies of the efficacy of poly [oxyethylene (dimethyliminio) ethylene (dimenthyliminio) ethylene dichloride] as a biocide against the Asian clam, *Corbicula fluminea*. Proceedings: service water reliability improvement seminar. Electric Power Research Institute, Palo Alto.

McMahon, R., B. Shipman e D. Long (1993). "Laboratory Efficacies of Nonoxidizing Molluscicides on the Zebra Mussel(*Dreissena polymorpha*) and the Asian Clam(*Corbicula fluminea*)." IN: *Zebra Mussels: Biology, Impacts, and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993. p 575-598, 5 fig, 1 tab, 36 ref.

McMahon, R., B. Shipman e J. Ollech (1989). Effects of Two Molluscicides on the Freshwater Macrofouling Bivalves, *Corbicula Fluminea* and *Dreissena Polymorpha*. EPRI Service Water Reliability Improvement Seminar, Charlotte, NC.

Miller, R. e F. McClure (1931). "The fresh-water clam industry of the Pearl River." *Lingnan Science Journal* 10(2-3): 307-322.

Mills, E. L., G. Rosenberg, A. P. Spidle, M. Ludyanskiy, Y. Pligin e B. May (1996). "A review of the biology and ecology of the quagga mussel (*Dreissena bugensis*), a second species of freshwater dreissenid introduced to North America." *American Zoologist* 36(3): 271-286.

Mizuno, T. e S. Mori (1970). "Preliminary hydrobiological survey of some Southeast Asian inland waters." *Biological Journal of the Linnean Society* 2(2): 77-118.

Monteiro, A. L. d. O. e L. V. Medani (2016). "Estudo de segurança de processo industrial na produção de amônia por gás de síntese."

Montresor, L. C. (2015). "Implicações Ecotoxicológicas Do Controle Químico del *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia: Mytilidae)."

Montresor, L. C., K. C. Miranda-Filho, A. Paglia, D. M. Luz, J. M. Araújo, M. J. d. S. Silva, L. Gerhard, C. B. Martinez e T. H. Vidigal (2013). "Short-term toxicity of ammonia, sodium hydroxide and a commercial biocide to golden mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857)." *Ecotoxicology and environmental safety* 92: 150-154.

Morton, B. (1973). "Some aspects of the biology and functional morphology of the organs of feeding and digestion of *Limnoperna fortunei* (Dunker)(Bivalvia: Mytilacea)." *Malacologia* 12(2): 265.

Morton, B. (1996). "The aquatic nuisance species: a global perspective and review." *Zebra mussels and other aquatic Species*. Ann Arbor, AnnArgor Press, 54p.

Morton, B. (1997). "The aquatic nuisance species problem: a global perspective and review." *Zebra mussels and aquatic nuisance species*: 1-54.

Morton, B. (2015). *The biology and anatomy of Limnoperna fortunei, a significant freshwater bioinvader: blueprints for success. Limnoperna Fortunei*, Springer: 3-41.

Mummert, A. K., R. J. Neves, T. J. Newcomb e D. S. Cherry (2003). "Sensitivity of juvenile freshwater mussels (*Lampsilis fasciola*, *Villosa iris*) to total and un-ionized ammonia." *Environmental toxicology and chemistry* 22(11): 2545-2553.

Nakai, K. (1995). "Intrusion of the freshwater mytilid mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), into Japan." *Kansai Shizhenhogo Kiko* 17: 45-56.

Netto, O. S. M. (2012). "Controle da incrustação de organismos invasores em materiais de sistemas de resfriamento de usinas hidrelétricas."

Neubert, M. G., M. Kot e M. A. Lewis (2000). "Invasion speeds in fluctuating environments." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 267(1453): 1603.

Newton, T. J., M. A. Boogaard, B. R. Gray, T. D. Hubert e N. A. Schloesser (2017). "Lethal and sub-lethal responses of native freshwater mussels exposed to granular Bayluscide®, a sea lamprey larvicide." *Journal of Great Lakes Research* 43(2): 370-378.

Oliveira, C. R. C., R. Fugi, K. P. Brancalhão e A. A. Agostinho (2010). "Fish as potential controllers of invasive mollusks in a neotropical reservoir."

Oliveira, M. d., D. Ayroza, D. Castellani, M. d. C. Campos e M. Mansur (2014). "O mexilhão dourado nos tanques-rede das pisciculturas das Regiões Sudeste e Centro-Oeste." *Panorama da Aquicultura* 24(145): 22-29.

Oliveira, M., R. Claudil, T. Prescott, D. Barbosa e M. Campos (2013). Estado de controle do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*) no Brasil: opções para controle e lacunas de conhecimento. Embrapa Pantanal-Resumo em anais de congresso (ALICE), In: Simpósio sobre recursos naturais e socioeconômicos do pantanal.

O'Neill Jr, C. R. (1997). "Economic impact of zebra mussels- results of the 1995 National Zebra Mussel Information Clearinghouse Study." *Great Lakes Research Review* 3(1): 35-44.

Orensanz, J. M. L., E. Schwindt, G. Pastorino, A. Bortolus, G. Casas, G. Darrigran, R. Elías, J. J. L. Gappa, S. Obenat e M. Pascual (2002). "No longer the pristine confines of the world ocean: a survey of exotic marine species in the southwestern Atlantic." *Biological Invasions* 4(1-2): 115-143.

Paschoalato, C. F. P. R., M. R. Trimailovas e L. Di Bernardo (2008). "Formação de subprodutos orgânicos halogenados nas operações de pré-oxidação com

cloro, ozônio e peroxônio e pós-cloração em água contendo substância húmica." *Engenharia Sanitária e Ambiental* 13(3): 313-322.

Pastorino, G., G. Darrigran, S. M. Martin e L. Lunaschi (1993). "*Limnoperna fortunei* (DUNKER, 1857) (Mytilidae), a new bivalve invading the waters of Rio de La Plata." *Neotropica La Plata* 39: 101-102.

Perepelizin, P. V. (2011). Alternativas ambientalmente inocuas (no químicas) para el control del mejillón incrustante *Limnoperna fortunei* en instalaciones industriales, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Perepelizin, P. V. e D. Boltovskoy (2014). "Effects of 254 nm UV irradiation on the mobility and survival of larvae of the invasive fouling mussel *Limnoperna fortunei*." *Biofouling* 30(2): 197-202.

Pérez, M., M. García, G. Blustein e M. Stupak (2007). "Tannin and tannate from the quebracho tree: an eco-friendly alternative for controlling marine biofouling." *Biofouling* 23(3): 151-159.

Perry, K. e J. Lynn (2009). "Detecting physiological and pesticide-induced apoptosis in early developmental stages of invasive bivalves." *Hydrobiologia* 628(1): 153-164.

Pestana, D., A. Ostrensky, M. K. Tschá e W. A. Boeger (2010). "Prospecção do molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) nos principais corpos hídricos do estado do Paraná, Brasil." *Papéis Avulsos de Zoologia (São Paulo)* 50: 553-559.

Petrille, M. S. (2000). "Efficacy of hydrogen peroxide for control of adult zebra mussels, *Dreissena polymorpha* and Asiatic clams, *Corbicula fluminea*." En: *Proceedings of the 10th International Aquatic Nuisance Species and Zebra Mussel Conference*. Toronto, Canada.

Phillips, S., T. Darland e M. Sytsma (2005). *Potencial Economic Impacts of Zebra Mussels on the Hydropower Facilities in the Columbia River Basin*. Prepared for the Bonneville Power Administration by Pacific States Marine Fisheries Commission.

Pianowski, E. H. e P. R. Janissek (2003). "Desinfecção de efluentes sanitários com uso de cloro: avaliação da formação de trihalometanos." *SANARE-Revista Técnica da Sanepar*: 06-17.

Pimentel, D., R. Zuniga e D. Morrison (2005). "Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States." *Ecological Economics* 52: 273-288.

Pizarro, H., E. Di Fiori, R. Sinistro, M. Ramírez, P. Rodríguez, A. Vinocur e D. Cataldo (2016). "Impact of multiple anthropogenic stressors on freshwater: how do glyphosate and the invasive mussel *Limnoperna fortunei* affect microbial communities and water quality?" *Ecotoxicology* 25(1): 56-68.

Rajagopal, S., G. van der Velde e H. A. Jenner (2002). "Effects of low-level chlorination on zebra mussel, *Dreissena polymorpha*." *Water Research* 36(12): 3029-3034.

Rajagopal, S., G. Van der Velde, M. Van der Gaag e H. A. Jenner (2003). "How effective is intermittent chlorination to control adult mussel fouling in cooling water systems?" *Water Research* 37(2): 329-338.

Rejmanek, M. e D. M. Richardson (1996). "What attributes make some plant species more invasive?" *Ecology* 77(6): 1655-1661.

Resende, M. F. (2014). "Interferências provocadas pela infestação de mexilhões-dourados (*Limnoperna fortunei*) sobre bombas centrífugas e seu impacto em sistemas de bombeamento de água."

Ribeiro, L. F. (2001). "Aplicação de dióxido de cloro como alternativa para desinfecção de esgotos sanitários tratados através de lagoas de estabilização."

Ricciardi, A. (1998). "Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): another fouling threat to freshwater systems." *Biofouling* 13(2): 97-106.

Ricciardi, A. (1998). "Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): another fouling threat to freshwater systems." *Biofouling* 13(2): 97-106.

Ricciardi, A. e H. J. MacIsaac (2000). "Recent mass invasion of the North American Great Lakes by Ponto-Caspian species." *Trends in Ecology & Evolution* 15(2): 62-65.

Richardson, D. M., P. Pysek e M. Rejmanek (2000). "Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions." *Diversity and Distributions* 6: 93-107.

Rolla, M. e H. Mota (2010). "Response of a major Brazilian utility to the golden mussel invasion." *Monitoring and control of macrofouling mollusks in freshwater systems*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton: 396-403.

Santos, C. P. d., M. C. D. Mansur e N. L. Würdig (2008). "Variações no comprimento dos indivíduos de uma população do mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Mollusca: Bivalvia: Mytilidae), ao longo do ano, na praia do Veludo, Lago Guaíba, Rio Grande do Sul, Brazil." *Revista Brasileira de Zoologia*. São Paulo, SP. Vol. 25, n. 3 (set. 2008), p. 389-396.

Santos, S., S. Thiengo, M. Fernandez, I. Miyahira, I. Gonçalves, R. d. F. Ximenes, M. Mansur e D. Pereira (2012). "Espécies de moluscos límnicos invasores no Brasil." *Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora: 25-50.

Segundo, S. M. A., O. Kosel, L. F. L. Vianna, E. Esmanhoto e E. F. A. Neves (1993). Metodologia desenvolvida para remoção de "fouling" no sistema de

resfriamento das unidades geradoras da usina Governador Parigot de Souza – US/GPS. XII SNPTEE.

Shi, H., R. Magaye, V. Castranova e J. Zhao (2013). "Titanium dioxide nanoparticles: a review of current toxicological data." *Particle and fibre toxicology* 10(1): 15.

Silva, C. L. P. A. C. (2013). Ação moluscicida de *Moringa oleifera* LAM sobre o molusco *Blomphalaria glabrata* (SAY, 1818) hospedeiro intermediário do *Schistosoma mansoni* (Sambon, 1907) e efeitos ecotoxicológicos em organismos aquáticos não alvo, Instituto Oswaldo Cruz.

Silva, E. C. e F. Barros (2011). "Macrofauna Bentônica Introduzida Do Brasil: Lista De Espécies Marinhas E Dulcícolas E Distribuição Atual." *Oecologia Australis* 15(2): 326-344.

Singer, P. C. (1994). "Control of disinfection by-products in drinking water." *Journal of environmental engineering* 120(4): 727-744.

Soares, M. d. F., D. Pereira, C. P. dos Santos, M. C. D. Mansur, M. Pires, J. O. Breitenbach e C. Grespan (2009). "Toxicidade do sulfato de cobre ao mexilhão dourado, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), em água bruta." *Ecotoxicol, J Braz Soc.*

Souza, R. C. C. L. d., S. H. Calazans e E. P. Silva (2009). "Impacto das espécies invasoras no ambiente aquático." *Ciência e cultura* 61(1): 35-41.

Sprecher, S. L. e K. D. Getsinger (2000). *Zebra Mussel Chemical Control Guide*, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Engineer Research.

Sylvester, F., D. Boltovskoy e C. Cataldo (2009). "Taxas de clareamento: ritmos e impacto." G. Darrigran e C. Damborenea. *Introdução a biologia das invasões: o mexilhão dourado na América do Sul: biologia, impacto, prevenção e controle*. São Carlos: Cubo: 246.

TenEyek, M. (2009). *Sodium hydroxide (NaOH). Great Ships Initiative Bench-Scale Test Findings, Technical Report—Public GSI/BS/5*.

Uryu, Y., K. Iwasaki e M. Hinoue (1996). "Laboratory experiments on behaviour and movement of a freshwater mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker)." *Journal of Molluscan studies* 62(3): 327-341.

USEPA, D. (2009). "Update of Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia-Freshwater." US Environmental Protection Agency, Office of Water.

Vale, G., K. Mehennaoui, S. Cambier, G. Libralato, S. Jomini e R. F. Domingos (2016). "Manufactured nanoparticles in the aquatic environment-biochemical responses on freshwater organisms: a critical overview." *Aquatic Toxicology* 170: 162-174.

Waller, D. L., J. J. Rach, W. G. Cope, L. L. Marking, S. W. Fisher e H. Dabrowska (1993). "Toxicity of candidate molluscicides to zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) and selected nontarget organisms." *Journal of Great Lakes Research* 19(4): 695-702.

Xia, Z., A. Zhan, Y. Gao, L. Zhang, G. D. Haffner e H. J. MacIsaac (2018). "Early detection of a highly invasive bivalve based on environmental DNA (eDNA)." *Biological Invasions* 20(2): 437-447.

Xu, M., Z. Wang, N. Zhao e B. Pan (2015). "Growth, reproduction, and attachment of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in water diversion projects." *Acta Ecologica Sinica* 35(4): 70-75.

Zagonel, S. (2011). "Estudo do desgaste abrasivo de aço carbonitretado em diferentes relações amônia/propano."

Anexo I

Tabela 3.1. Impactos ocasionados pelo mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) em ambientes dulcícolas.

Compartimento/ setor impactado	Tipo de impacto	Referências
Plâncton	Aumento das taxas de clareamento, com consequente redução da biomassa planctônica e alteração dos fluxos de nutrientes, pois um único indivíduo pode filtrar cerca de 100 ml/h	Bayne (1976); Morton (1972); Boltovskoy, Karatayev et al. (2009); Cataldo, O'Farrell et al. (2012); Cataldo, Vinocur et al. (2012)
	Estímulo ao crescimento do bacterioplâncton (incluindo cianobactérias) e do perifíton	Cataldo, Vinocur et al. (2012), Boltovskoy and Correa (2015), Pizarro, Di Fiori et al. (2016);
	Redução da abundância e diversidade do zooplâncton	Molina, Paggi et al. (2010), Fachini (2011), Molina, de Paggi et al. (2011)
Nécton	Alteração da dieta de peixes e aves predadoras de moluscos	Wormington and Leach (1992); Morrison, Lynch et al. (1997)
	Hospedeiros intermediários de parasitos em peixes	Ogawa, Nakatsugawa et al. (2004)
Bentos	Criação e modificação de micro habitats	Morton (1977); Darrigran and Ezcurra de Drago (2000); Sylvester, Boltovskoy et al. (2007); Sardiña, Cataldo et al. (2008)
	Competição com organismos filtradores nativos e redução da sua abundância e diversidade	Strayer and Smith (1996); Darrigran (2002) Sylvester, Boltovskoy et al. (2007); Lopes, Vieira et al. (2009); Molina and Williner (2013)
	Aumento das taxas locais de sedimentação Redução das concentrações locais de oxigênio dissolvido, em função das elevadas densidades de indivíduos e consequente acúmulo de fezes e pseudofezes	Phelps (1994); MacIsaac (1996) Effler and Siegfried (1994), Sylvester, Boltovskoy et al. (2009)

Compartmento/ setor impactado	Tipo de impacto	Referências
Macrófitas	Aumento do número de macrófitas no ambiente	Boltovskoy, Karatayev et al. (2009)
	Alteração da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas	Caraco, Cole et al. (1997); Phelps (1994); Boltovskoy, Karatayev et al. (2009); Boltovskoy and Correa (2015)
	Facilitação da colonização de outros organismos invasores	Morton (1975)
	Comprometimento da biodiversidade local/regional	Ricciardi (1998)
	Potencialização dos impactos provocados por agrotóxicos	Pizarro, Di Fiori et al. (2016)
Ecossistemas aquáticos como um todo	Aumento das concentrações de amônia, nitrito e fosfato	Boltovskoy and Correa (2015)
	Transferência de metais pesados e de organoclorados para níveis tróficos superiores	De Kock and Bowmer (1993); MacIsaac (1996)
	Contaminação da água durante eventos de mortalidade em massa de mexilhões	Darrigran and Damborenea (2005)
	Acúmulo de conchas vazias	Darrigran and Damborenea (2005)
	Redução do diâmetro útil de tubulações e redução da do fluxo de água em sistemas de resfriamento	Darrigran and Ezcurra de Drago (2000), Darrigran (2002), Matsui, Nagaya et al. (2002), de Almeida Diniz (2010)
Geração de energia elétrica (usinas térmicas e hidrelétricas)	Entupimento de grades da tomada de água	Ricciardi (1998), Darrigran and Damborenea (2005)
	Entupimento de filtros	Phillips, Darland et al. (2005)
	Aumento das taxas de produção/decomposição de material orgânico	Phillips, Darland et al. (2005); Bergmann, Mansur et al. (2010)
	Aumento na corrosão de tubulações, ligas metálicas, concreto e polímeros, pela proliferação de outros	

Compartimento/ setor impactado	Tipo de impacto	Referências
	agentes biológicos indesejáveis (bactérias, fungos, etc.)	
	Diminuição da vida útil de equipamentos pelo aumento da manipulação durante a manutenção	Phillips, Darland et al. (2005), de Almeida Diniz (2010)
	Redução da velocidade do fluxo de água em tubulações devido a perdas por fricção (fluxos turbulentos)	Phillips, Darland et al. (2005)
	Acúmulo de conchas vazias e contaminação da água por mortalidade massiva durante a aplicação de métodos de controle	Dreher, Gustavo et al. (2003); Phillips, Darland et al. (2005); Darrigran and Damborenea (2005); Capitoli, Colling et al. (2008)
	Redução da eficiência de equipamentos de troca térmica	Phillips, Darland et al. (2005)
	Aumento da frequência e dos custos com manutenção	Diniz (2010); Perepelizin and Boltovskoy (2014)
	Entupimento de tubulação	Morton (1972)
	Danos a barragens	Temcharoen (1992); Uryu, Iwasaki et al. (1996)
	Contaminação orgânica e acúmulo de conchas vazias	Darrigran and Ezcurra de Drago (2000)
	Aumento dos custos com cloração da água	Morton (1977)
Aquicultura	Entupimento de malhas de tanques-rede, com consequente redução da circulação de água	de Oliveira and de Barros (2003); Lösch, Boscolo et al. (2009); Marengoni, Klosowski et al. (2013); Oliveira, Ayroza et al. (2014)
Indústrias	Entupimento e deterioração de sistemas hidráulicos	Mäder Netto (2011)

Compartimento/ setor impactado	Tipo de impacto	Referências
Turismo	Restrições ao turismo para evitar a dispersão da espécie	O'Neill Jr (1997)
Hidrovias	Danos ao funcionamento de eclusas	O'Neill Jr (1997); Goulart and Saito (2012)
Marinas	Aumento dos custos com limpeza de embarcações e restrições de uso de embarcações	O'Neill Jr (1997); Darrigran and Damborenea (2009)