



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista

LUCAS FERREIRA DE SOUZA

**ÁREAS AMBIENTALMENTE ADEQUADAS PARA O CULTIVO DAS ESPÉCIES
DE INTERESSE ECONÔMICO *HOLOTHURIA (HALODEIMA) GRISEA* (SELENKA,
1867) (HOLOTÚRIA) E *CRASSOSTREA TULIPA* (LAMARCK, 1819) (OSTRA), DE
ACORDO COM MODELAGENS DE NICHO ECOLÓGICO (ENM)**

São Vicente

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista

LUCAS FERREIRA DE SOUZA

ÁREAS AMBIENTALMENTE ADEQUADAS PARA O CULTIVO DAS ESPÉCIES DE INTERESSE ECONÔMICO *HOLOTHURIA (HALODEIMA) GRISEA (SELENKA, 1867) (HOLOTÚRIA)* E *CRASSOSTREA TULIPA (LAMARCK, 1819) (OSTRA)*, DE ACORDO COM MODELAGENS DE NICHO ECOLÓGICO (ENM)

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Ciências
Biológicas com habilitação em Biologia Marinha
junto ao Conselho do Curso de Bacharelado em
Ciências Biológicas, do Instituto de Biociências, do
Campus do Litoral Paulista da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
Campus de São Vicente.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Sergio Nunes Silva Filho
Coorientadora: Caroline Nunes Parreira

São Vicente
2022

S729a

Souza, Lucas Ferreira de

Áreas ambientalmente adequadas para o cultivo das espécies de interesse econômico *Holothuria (Halodeima) grisea* (Selenka, 1867) (holotúria) e *Crassostrea tulipa* (Lamarck, 1819) (ostra), de acordo com modelagens de nicho ecológico (ENM) / Lucas Ferreira de Souza. -- São Vicente, 2022

40 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, São Vicente

Orientador: Ivan Nunes

Coorientadora: Caroline Nunes Parreira

1. Biologia Modelos matemáticos. 2. Ecologia costeira. 3. Biogeografia. 4.

Maricultura. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, São Vicente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Dedico este trabalho ao Shiro (in memoriam), que impulsionou meu ingresso na faculdade, e aos meus avós, que também não puderam ver eu concluir a graduação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cesar e Creusa, e irmãos, André, Fernanda e Pedro, por todo o tipo de apoio que me forneceram ao longo da graduação.

À minha namorada Giovanna pelo seu amor, e à sua família, pelo acolhimento.

À toda comunidade unespiana, em especial ao IB-CLP, à Lateria, ao C.A.Içara, à Jaws, e às Turmas XV (bach.) e IV (lic.), pela união e sentimento de pertencimento.

Aos meus amigos Leprechais, da República S.O.S., da República Xablau, da FPP, e da TTCR, os irmãos que eu escolhi.

Aos meus colegas e amigos da SABESP e seus familiares, com quem tive ótimos momentos.

Ao LHERP, em especial aos meus orientadores, Ivan e Caroline, pelo âmbito de ciência e pesquisa.

À Alexandra Elbakyan, ao Aaron Swartz (in memoriam), e a todos os outros que lutaram ou ainda lutam pela democratização do conhecimento.

“Ecologia sem luta de classes é jardinagem.”
(Chico Mendes)

RESUMO

O Brasil dispõe de imensa e subaproveitada capacidade de produção no setor da aquicultura, incluindo o cultivo de espécies nativas e de baixo nível trófico como *Holothuria grisea* (holotúria) e *Crassostrea tulipa* (ostra), que oferecem menores riscos e impactos ao meio ambiente quando em comparação a espécies exóticas, e podem ser inseridas em cultivos de aquicultura multitrófica integrada (IMTA). O objetivo deste trabalho foi, através de modelagens de nicho ecológico (ENMs), inferir a adequabilidade ambiental dessas duas espécies em todo o litoral brasileiro, revelando uma predição das regiões em que haveria maior produtividade no cultivo e assim, maior retorno econômico, social e ambiental, de acordo com os pilares da aquicultura sustentável. As modelagens foram realizadas com o algoritmo Maxent, utilizando dados de ocorrência e de variáveis ambientais obtidos em bancos de dados abertos. Embora existam algumas ressalvas principalmente quanto à modelagem de *C. tulipa* (como um baixo número de registros de ocorrência), os resultados adquiridos obtiveram bom desempenho estatístico e fornecem um pequeno incremento aos pacotes tecnológicos dessas espécies, e podem servir como indicativos para nortear a escolha de futuros locais de cultivo. Isto ocorreria, de forma mais adequada, em união a estudos maiores e mais detalhados para cada uma das espécies.

Palavras-chave: Aquicultura; Modelagem de Nicho Ecológico (ENM); Maxent; *Holothuria grisea*; *Crassostrea tulipa*.

ABSTRACT

Brazil has a huge and under-exploited production capacity in the aquaculture industry, including the cultivation of native and low trophic species such as *Holothuria grisea* (holothuria) and *Crassostrea tulipa* (oyster), which offers less risks and impacts to the environment when compared to exotic species, and can be inserted in integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) cultivs. Making use of ecological niche modellings (ENMs), this study aimed to infer the environmental suitability of both species throughout the Brazillian coast, revealing a prediction of which regions would have better cultivation productivity and thus, greater economic, social and environmental returns, according to the sustainable aquaculture pillars. The modellings were made with the Maxent algorithm, using occurrence and environmental variables data obtained from open databases. Although there are some reservations mainly regarding *C. tulipa* modelling (such as the low occurrence data points), acquired results obtained a high statistical performance and provide a small increment to the technological packages of these species, and can serve as indicatives to guide the selection of future cultivation sites. This would more appropriately occur in conjunction with larger and more detailed studies for each of the species.

Keywords: Aquaculture; Ecological Niche Modelling (ENM); Maxent; *Holothuria grisea*; *Crassostrea tulipa*.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUC – *Area Under the Curve* (área sob a curva)

CBI – *Continuous Boyce Index* (índice de Boyce contínuo)

ENM – *Ecological Niche Modelling* (modelagem de nicho ecológico)

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura)

GBIF – *Global Biodiversity Information Facility*

GEBCO – *General Bathymetric Chart of the Oceans*

IMTA – *Integrated Multi-Trophic Aquaculture* (aquicultura multitrófica integrada)

ROC – *receiver operating characteristic* (característica de operação do receptor)

SDM – *Species Distribution Modelling* (modelagem de distribuição de espécies)

VIF – *Variance Inflation Factor* (fator de inflação de variância)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1.....A AQUICULTURA SUSTENTÁVEL NO BRASIL

1.2.....ESPÉCIES NATIVAS PROMISSORAS

1.3.....MODELOS DE NICHOS ECOLÓGICOS

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.....LEVANTAMENTO DE DADOS

2.2.....SELEÇÃO DOS DADOS AMBIENTAIS

2.3.....MODELAGEM

2.4.....VALIDAÇÃO

3 RESULTADOS

3.1.....HOLOTHURIA GRISEA

3.2.....CRASSOSTREA TULIPA

4 DISCUSSÃO

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

REFERÊNCIAS

TABELAS

FIGURAS

1 INTRODUÇÃO

Em crescimento global, a aquicultura é um setor econômico que contribui para a redução de superexploração de recursos pesqueiros (LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018), e que é especialmente atraente para o Brasil, o país com maior reserva de água doce do mundo, além de possuir litoral extenso e climas variados – um grande potencial subaproveitado (OLIVEIRA *et al.* 2018; RODRIGUES *et al.* 2012). Com a exploração agressiva, o crescimento da população mundial e o consequente aumento da demanda por alimentos, se torna necessário a procura e desenvolvimento de sistemas alternativos de produção, e um setor que se investido pode prover proteína animal de qualidade de forma sustentável, é a aquicultura (BOYD *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018). A aquicultura pode ser definida como a produção em cativeiro de organismos predominantemente aquáticos, como peixes (piscicultura), camarões (carcinicultura), rãs (ranicultura), algas, dentre outras, podendo o cultivo ser realizado no mar ou em águas continentais (RODRIGUES *et al.* 2012).

A sustentabilidade possui diversas descrições diferentes, mas há um consenso sobre seus pontos fundamentais: é um conceito antropocêntrico, que considera as necessidades humanas para alcançar a perenidade através de suas gerações, onde, para tal, a civilização deve viver respeitando os limites da natureza, a fim de que a próxima geração herde um estoque de recursos naturais igual ou maior àquele da geração anterior (VALENTI *et al.* 2018). A produção de organismos aquáticos no campo da sustentabilidade é denominada aquicultura sustentável. Ela pode ser definida pelos seus objetivos principais: produção lucrativa, desenvolvimento social, e a preservação do meio ambiente e dos recursos naturais – fatores essenciais para que a atividade seja perene (DE OLIVEIRA, 2015; VALENTI, 2002). Ou então, de forma mais direta: “a aquicultura sustentável é a produção lucrativa de organismos aquáticos, onde se mantém a interação harmônica e contínua com os ecossistemas e comunidades locais” (VALENTI *et al.* 2018, p. 409, tradução nossa).

Levando em conta esta visão da sustentabilidade, um conveniente modo de cultivo é a aquicultura multitrófica integrada (IMTA). A IMTA combina em um mesmo espaço (ou espaços próximos) o cultivo de duas ou mais espécies de diferentes níveis tróficos (ou diferentes nichos) que não competem entre si, onde com as proporções e interações apropriadas é criado um sistema balanceado e sustentável

(ecologicamente, economicamente e socialmente) (BOYD *et al.* 2020). Uma interação comum nestes sistemas é aquela em que os resíduos da produção de uma espécie são incorporados e aproveitados na produção de outra, gerando assim uma integração entre os cultivos e uma maior eficiência ao satisfazer a característica mais importante deste tipo de criação (IMTA): combinar espécies que expressam funções ecossistêmicas complementares (BOYD *et al.* 2020). Através dos efeitos sinérgicos gerados na IMTA é aumentado o rendimento da produção, enquanto se reduz os requisitos alimentares e o desperdício de nutrientes e resíduos (ZAMORA *et al.* 2018).

1.1 A AQUICULTURA SUSTENTÁVEL NO BRASIL

Apesar de ter numerosas espécies nativas de valor conhecido (e ainda, de valor desconhecido), o Brasil, país com maior diversidade ictiológica do mundo (RESENDE, 2009) – com mais de 2.800 espécies de peixes (BUCKUP; MENEZES; GHAZZI, 2007; MENEZES *et al.* 2003) – tem na aquicultura um maior foco na tilápiado-nilo (*Oreochromis niloticus*), uma espécie exótica, generalista e agressiva (SANCHES *et al.* 2012), devido à sua importância econômica conquistada através de pesquisas e estudos de manejo e biologia que visavam promover um maior aproveitamento de seu cultivo (DE OLIVEIRA, 2015), e que está entre as espécies de peixes mais consumidas no mundo (RODRIGUES *et al.* 2012). A criação de espécies exóticas, entretanto, contrapõe a ideia de preservação ambiental, já que a aquicultura é a principal responsável pela introdução de espécies exóticas de peixes de água doce no Brasil e no mundo (LATINI *et al.* 2021; LIMA JR *et al.* 2012), e espécies exóticas invasoras são uma das principais causas de perda de biodiversidade do planeta (DUENAS *et al.* 2021; GENTILI *et al.* 2021; IUCN, 2000). Assim, existe o consenso de que a melhor maneira de se evitar os impactos negativos de espécies não-nativas, é prevenir tal introdução mesmo na ausência de evidências negativas do fenômeno, devido aos custos e dificuldades de reparação (como a remoção da espécie invasora, por exemplo) (LIMA JR *et al.* 2012).

Se, além de uma inserção de capital de giro e um aperfeiçoamento burocrático, a mesma política de pesquisa e desenvolvimento que foi destinada à tilápia-do-nilo for aplicada em prol do aprimoramento do pacote tecnológico de espécies nativas promissoras, o país pode contemplar o surgimento de novas potências econômicas no setor (RODRIGUES *et al.* 2012), e, neste caso, sem os riscos e malefícios da

introdução de espécies exóticas, consideradas grandes vetores de perturbações – como impactos na qualidade da água, competição com espécies nativas (LIMA JR *et al.* 2012), e também sem os custos que a produção de exóticos conseqüentemente origina ao país, para prevenir, reduzir, e/ou mitigar os danos de possíveis invasões (ZENNI *et al.* 2021).

É relevante também ter em vista que o Brasil é signatário de diversos tratados de conservação e sustentabilidade, entre eles a Convenção sobre Diversidade Biológica, um tratado da Organização das Nações Unidas e um dos mais importantes instrumentos internacionais relacionados ao meio ambiente (LATINI *et al.* 2021; LIMA JR *et al.* 2012). Assim, o Brasil assume diversas responsabilidades, entre elas impedir que se introduzam, controlar, ou erradicar espécies exóticas que ameacem os ecossistemas, habitats ou espécies nativas, porém o país ainda se encontra sancionando leis que incentivam a produção de espécies exóticas, expondo a falta de informação sobre o tema e a enorme distância entre a gestão pública e a comunidade científica, direcionando a nação a um caminho que não reconhece o meio ambiente e os recursos naturais como patrimônios a serem preservados para uso da sociedade atual e futura (FEARNSIDE, 2016; LATINI *et al.* 2021; LIMA JR *et al.* 2012).

A receita anual da aquicultura brasileira é superior a 1 bilhão de dólares, no entanto, considerando todos os recursos naturais, tecnológicos e financeiros, esta indústria ainda está aquém de seu potencial (VALENTI *et al.* 2021b). Dentre os diversos fatores responsáveis por essa imensa capacidade de produção no setor, fora os já citados extensos recursos hídricos, é possível salientar que existe no Brasil um grande mercado consumidor e uma sólida comunidade científica capaz de prover assistência analítica na produção. Deste modo, o país apresenta mais do que apenas um clima favorável para o cultivo da exótica tilápia-do-nilo (RODRIGUES *et al.* 2012): mencionando alguns exemplos, possui potencial no cultivo de holotúrias (pepinos-do-mar) (PONTE; FEITOSA, 2019), e de crustáceos e moluscos (RODRIGUES *et al.* 2012), como camarões de água doce (*Macrobrachium rosenbergii*) e salgada (*Litopenaeus vannamei*) (VALENTI *et al.* 2021a), lagostas palinurídeas (IGARASHI, 2008), e bivalves do gênero *Crassostrea* (OLIEVEIRA *et al.* 2018). Também desfruta de uma grande variedade de espécies nativas valorosas para suas regiões, como o pintado (*Pseuplatystoma corruscans*) no Centro-Oeste, o tambaqui (*Colossoma macropomum*) no Norte, e o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) e os diversos híbridos destes gêneros amplamente distribuídos em diversas regiões (RESENDE, 2009;

VALENTI *et al.* 2021a). Dessas espécies nativas promissoras, são relevantes e enfatizadas neste trabalho as espécies de baixo nível trófico *Holothuria grisea* (holotúria) e *Crassostrea tulipa* = *C. gasar* (ostra), que, dados os devidos estudos e experimentos, podem ser viabilizadas criadas em monoculturas ou ainda adicionadas a cultivos de outras espécies a fim de formar sistemas de aquicultura multitrófica integrada (IMTA), ou inseridas em sistemas de IMTA já existentes, aproveitando-se de seus hábitos alimentares detritívoros (BOYD *et al.* 2020; ZAMORA *et al.* 2018).

1.2 ESPÉCIES NATIVAS PROMISSORAS

Holotúrias contêm diversas substâncias químicas com um grande leque de atividades biológicas que contribuem para o seu grande e crescente espaço no mercado asiático, onde são usadas como alimento e na medicina tradicional (PEREIRA *et al.* 2018; SUN *et al.* 2008). As holotúrias são uma classe de equinodermos (Holothuroidea) – invertebrados marinhos dioicos (porém sem um claro dimorfismo sexual) com fecundação externa – que desempenham importantes funções ecológicas: ciclagem de nutrientes, bioturbação, incremento da biodiversidade, e redução da acidificação (PEREIRA *et al.* 2018). Em termos nutricionais, holotúrias possuem um elevado valor alimentar: elas apresentam elementos traços (oligoelementos), aminoácidos essenciais, além de mais proteína e menos gordura que a maior parte dos alimentos (CHEN *et al.* 2005). Estas características fazem das holotúrias alimentos saudáveis, sendo consideradas na China há centenas de anos “alimentos tônicos”, termo próximo e correlacionado à medicina tradicional oriental, onde a filosofia chinesa compreende alimentação e medicina como uma única entidade (CHEN *et al.* 2005), porém esta destinação farmacêutica/nutricional recentemente se expandiu no mercado ocidental (ZAMORA *et al.* 2018).

Ao redor do mundo a captura de holotúrias é feita com diversos métodos e espécies (ZAMORA *et al.* 2018), e no Brasil, apesar de ser uma atividade com potencial econômico como nova fonte de frutos do mar, não é regulamentada ou supervisionada pelos governos estaduais e federal, portanto, pouco se sabe sobre os seus números e eventuais impactos (PONTE; FEITOSA, 2019). Entretanto, são conhecidas diversas características das holotúrias que fazem delas especialmente suscetíveis à sobrepesca, como a baixa velocidade de movimento, seu fácil acesso

pelos pescadores de comunidades costeiras, e a sua inferida baixa taxa de recrutamento (UTHICKE; CONAND, 2005). Os danos gerados pela sobrepesca de holotúrias geraram um aumento no seu valor de mercado, enquanto também estimulando tentativas de desenvolver a aquicultura de diversas espécies (ZAMORA *et al.* 2018).

A espécie de holotúria mais abundante no Brasil é *Holothuria grisea*. É amplamente distribuída entre a Flórida e o Brasil, e no país é encontrada do sul de Santa Catarina até a região Nordeste (PEREIRA *et al.* 2018; SUN *et al.* 2008). Os animais desta espécie contêm um composto parecido com a heparina (anticoagulante com alto valor na indústria farmacêutica), e indivíduos adultos pesam por volta de 500 gramas, resultando entre 50 e 80 gramas de produto seco após o processamento (VALENTI *et al.* 2021a). Ainda segundo Valenti *et al.*, atualmente estão sendo feitos esforços em pesquisas com os objetivos de extrair quantidades comerciais do composto heparinóide e de cultivar a espécie.

Com um mercado já bem mais estabilizado que o das holotúrias, o cultivo de moluscos é o segundo maior setor da aquicultura no mundo, com uma produção anual de 17,1 milhões de toneladas e um valor de 29,2 bilhões de dólares (FAO, 2018), ficando atrás apenas da criação de peixes. A aquicultura é de longe a principal indústria proveniente de bivalves (FAO, 2020), animais que possuem diversas aplicações além do setor alimentício, trazendo usos e benefícios ecossistêmicos e culturais como ciclagem de nutrientes, acumulação bioquímica do nitrogênio (o que reduz a eutrofização), sequestro de carbono, redução da erosão, interações educacionais e acadêmicas (pesquisas científicas), festivais de mariscos, significância espiritual e religiosa, e diversos outros (VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020).

Está incluso nesses dados o cultivo de ostras, animais com grande valor nutricional e econômico em uma das áreas mais promissoras do setor (CAVALCANTI, 2003; OLIVEIRA *et al.* 2018). As ostras são moluscos bivalves que apresentam diversos elementos nutricionais, como proteínas, macro e oligoelementos, carboidratos, lipídios, vitaminas, e minerais, sendo desta forma uma parcela importante da dieta de comunidades litorâneas, além de estar no cardápio de restaurantes populares (CAVALCANTI, 2003; LAMEIRA SILVA *et al.* 2020). Na produção de ostras também se gera carbonato de cálcio, um subproduto derivado das conchas – material que, se aproveitado, possui valor econômico em indústrias variadas: materiais de construção, suplementos alimentares, farmacêutica,

alimentação de animais, produção de plástico, fertilizantes, dentre outras (H SILVA *et al.* 2019; VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020).

A maior produção de ostras no Brasil se concentra nas regiões do Sul (com destaque para Florianópolis - SC) e Sudeste, que sendo mais frias, favorecem a espécie exótica *Crassostrea gigas*. Já a espécie nativa *Crassostrea tulipa* (cultivada no Brasil desde os anos 80, no estado de São Paulo) (VALENTI *et al.* 2021a) é cultivada principalmente no Norte, como nos mangues da Amazônia – regiões mais quentes onde tende a ser mais produtiva (H SILVA *et al.* 2019; LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018; PAIXÃO *et al.* 2013) –, mas atualmente com diversos pequenos produtores também nas regiões Sul e Nordeste (VALENTI *et al.* 2021a). Apesar de ostras em geral serem relativamente tolerantes a alterações ambientais, a espécie nativa (*C. tulipa*) é mais tolerante a variações de salinidade e temperatura e alcança um maior tamanho em comparação aos outros membros do gênero (incluindo a exótica *C. gigas*) (OLIVEIRA *et al.* 2018).

1.3 MODELOS DE NICHOS ECOLÓGICO

Os organismos produzidos pela aquicultura podem ser diretamente afetados pelos parâmetros físico-químicos da área em que ocorre o cultivo, como no caso da ostra *C. tulipa*, em que fatores como sazonalidade de chuvas e salinidade influenciam em características como tamanho, taxas de reprodução, e até componentes nutricionais destes animais (LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018), demonstrando a tamanha importância na produtividade que detém a escolha do lugar em que ocorrerá o cultivo. Dessa forma, diversos parâmetros devem ser considerados na escolha do local de produção, a qual pode ser auxiliada através de estudos e modelagens de nicho ecológico (ENMs), também conhecidos como modelagens de distribuições de espécies (SDMs) (NAIMI; ARAÚJO, 2016; PETERSON; SOBERÓN, 2012).

Tais modelos são projetados através de algoritmos que combinam dados de locais de ocorrência de uma espécie (presença e ausência), com dados de diversas variáveis ambientais de selecionadas regiões, para desenvolver um sistema de inferência estatística com o objetivo de estipular os impactos destes fatores ambientais nos padrões de distribuição geográfica da espécie (determinação de nicho), e assim poder prever sua possível presença ou ausência em outras regiões

(predição de distribuição da espécie), de acordo com a sua deduzida adequabilidade ambiental (EFFROSYNIDIS *et al.* 2020; NABOUT *et al.* 2009).

Os modelos resultantes destes algoritmos fornecem informações significativas que subsidiam aplicações em áreas como planejamento de reservas, ecologia, evolução, epidemiologia, controle de espécies invasoras, dentre outras (PHILLIPS; ANDERSON; SCHAPIRE, 2006); estas previsões de adequabilidade ambiental podem também naturalmente e benéficamente serem empregues ao processo de procura dos locais mais propícios para o cultivo de espécies designadas. Esta é uma maneira em que aproveitando-se da tecnologia e da ciência é possível criar estímulos para o cultivo de espécies nativas como *H. grisea* e *C. tulipa* (RODRIGUES *et al.* 2012), que já fazem parte da aquicultura brasileira, seja de forma regular ou irregular (LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018; PONTE; FEITOSA, 2019).

Fazendo uso desses modelos de nicho ecológico, o objetivo deste trabalho então é inferir a adequabilidade ambiental destas espécies em todo o litoral brasileiro, atestando ou contestando regiões onde já são cultivadas, e revelando uma predição das regiões em que há potencial para uma maior produtividade no cultivo e assim, maior retorno econômico, social e ambiental, de acordo com os pilares da aquicultura sustentável (DE OLIVEIRA, 2015; VALENTI, 2002), impulsionando a produção de ambas. Caso os modelos empregados às espécies *H. grisea* e *C. tulipa* obtenham êxito nestes objetivos idealizados, existe ainda a expectativa de que a mesma metodologia possa ser usada para propósitos similares, como alavancar o cultivo de outras espécies nativas e de níveis tróficos baixos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a modelagem de nicho ecológico (ENM) das espécies *Holothuria grisea* e *Crassostrea tulipa*, foi utilizado o software Maxent (versão 3.4.3) (PHILLIPS; ANDERSON; SCHAPIRE, 2006). O Maxent é um algoritmo de ENM que faz uso do princípio da máxima entropia em dados de ocorrência com apenas presença das espécies (simples pares de dados longitude - latitude), e os correlaciona com uma série de camadas de dados de variáveis ambientais previamente selecionadas que presumivelmente desempenham alguma influência na adequabilidade ambiental destas espécies, de modo a calcular seus nichos ecológicos e distribuições

geográficas potenciais (PHILLIPS; ANDERSON; SCHAPIRE, 2006; WARREN; SEIFERT, 2011).

2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

As variáveis ambientais foram adquiridas de duas diferentes fontes: do banco de dados Bio-ORACLE (ASSIS *et al.* 2018; Bio-ORACLE, 2021; TYBERGHEIN *et al.* 2012), e do grupo GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) (GEBCO *Compilation Group*, 2021).

O Bio-ORACLE fornece informações ambientais oceânicas globais de superfície e de fundo do mar em uma resolução de 5 arco-minutos (0,083 grau, equivalente a aproximadamente 9,2 quilômetros na linha do equador), calculadas com base nas médias mensais dos dados coletados a partir de satélites e observações *in situ* no período entre 2000 e 2014 (ASSIS *et al.* 2018; DE OLIVEIRA, 2019; TYBERGHEIN *et al.* 2012). Cada célula na camada de dados possui, portanto, uma área de 5 x 5 arco-minutos². O Bio-ORACLE dispõe ainda, para as variáveis de fundo de mar, os dados da profundidade mínima, média, e máxima de cada célula.

O GEBCO é um grupo internacional de especialistas em mapeamento oceânico, e fornecem dados globais de batimetria dos oceanos em uma resolução de 15 arco-segundos (0,004 grau, equivalente a aproximadamente 460 metros na linha do equador) (GEBCO *Compilation Group*, 2021). Para realizar as modelagens, o Maxent necessita que todas as camadas de dados de variáveis ambientais possuam as mesmas dimensões geográficas – mesma resolução (tamanho de cada célula) e tamanho total –, portanto, com o auxílio do *software* QGIS (QGIS, 2021), através de sua ferramenta “*raster calculator*”, foi feita uma reamostragem da camada de dados de batimetria providenciada pelo GEBCO de modo com que sua resolução fosse diminuída em 20 vezes, igualando-se às do Bio-ORACLE (5 arco-minutos).

Os dados de ocorrência de ambas as espécies foram obtidos do banco de dados do GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*), uma infraestrutura internacional de redes e dados biológicos globais de livre acesso (GBIF, 2021). Estes dados de ocorrência, antes de analisados pelo Maxent, foram filtrados manualmente também com o auxílio do QGIS, de modo para que não houvesse repetição (mais de uma ocorrência da mesma espécie no mesmo ponto), ocorrências da mesma espécie na mesma célula de 5 x 5 arco-minutos² das camadas de dados de variáveis

ambientais do Bio-ORACLE e do GEBCO adaptado, ou ocorrências fora da área das variáveis ambientais (*C. tulipa* possui ocorrências principalmente em mangues dentro do continente, fora da área de abrangência das variáveis do Bio-ORACLE e do GEBCO). Após a filtragem, o total foi de 117 pontos de ocorrências para *H. grisea* (figura 1), e 21 pontos de ocorrências para *C. tulipa* (figura 2) – sendo inicialmente 360 e 68, respectivamente.

2.2 SELEÇÃO DOS DADOS AMBIENTAIS

Conforme declarado por Giovanelli, “[...] o primeiro passo como auxílio para a seleção das melhores variáveis deve ser o conhecimento da história natural do organismo em questão” (GIOVANELLI, 2019, p. 24, tradução nossa). Portanto, devido ao habitat destes animais (bentônicos), para as modelagens foram selecionadas do Bio-ORACLE apenas as variáveis ambientais oceânicas de fundo do mar, e, para melhor abordagem, foram escolhidos os dados da profundidade média de cada célula. São 12 as variáveis ambientais de fundo do mar disponibilizadas: temperatura, salinidade, velocidade das correntes, nitrato, fosfato, silicato, oxigênio molecular dissolvido, ferro, clorofila, fitoplâncton, produtividade primária, e luz no fundo. Para cada uma destas 12 variáveis, existem 6 tipos de valores: máximas, médias, mínimas, amplitudes, e máximas e mínimas a longo prazo (média das máximas e média das mínimas anuais), somando assim 72 camadas de variáveis ambientais bentônicas (tabela 1) (ASSIS *et al.* 2018), e totalizando com a variável batimétrica do GEBCO uma compilação de 73 camadas. Porém, devido à condição de *C. tulipa*, em que só foram considerados os pontos de ocorrência no mar apesar de conhecidamente ser uma espécie eurialina (MACEDO *et al.* 2020), foram excluídas de sua modelagem as 6 camadas de dados relacionadas à variável salinidade.

Uma outra maneira de se garantir modelos mais precisos, é identificando e selecionando as variáveis ambientais que não possuem multicolinearidade entre elas (GIOVANELLI, 2019), evitando viés e instabilidade na modelagem (NAIMI; ARAÚJO, 2016). Desta forma, através do pacote “usdm” (NAIMI, 2014; NAIMI *et al.* 2014) no software “R” (R CORE TEAM, 2021), foi realizado sobre a compilação de 73 camadas um teste de fator de inflação de variância (VIF) (LIN; FOSTER; UNGAR, 2011) com um limiar de correlação de 0,8 na fórmula “vifcor” (ČÍHAL; FIALOVÁ; PLÁŠEK, 2020; GRANADOS-MARTÍNEZ *et al.* 2021), do qual resultaram 21 variáveis sem

multicolinearidade (tabela 2), e 18 no mesmo teste com as 67 camadas onde a variável salinidade foi excluída (tabela 3), para serem aplicadas na modelagem de *C. tulipa* (GIOVANELLI, 2019; NAIMI; ARAÚJO, 2016).

2.3 MODELAGEM

Na etapa de execução da modelagem, os parâmetros definidos no *software* Maxent para ambas as espécies foram: 500 iterações máximas, 5.000 pontos de background, análise de importância de variáveis (“*jackknife*”), “*auto features*”, “*random seed*”, “*create response curves*”, e 25 para “*random test percentage*” (75% dos pontos usados para calibração do modelo, e 25% para a modelagem). Os modelos finais obtidos são a média de 10 réplicas (com o método “*bootstrap*” para “*replicated run type*”) para cada espécie realizadas nestes parâmetros (GIOVANELLI, 2019). Este procedimento foi repetido 4 vezes, mudando o valor do parâmetro “*regularization multiplier*” em cada uma: foram feitos com os valores 0,5; 1; 2; e 4 (RADOSAVLJEVIC; ANDERSON, 2014). Os demais parâmetros não especificados foram deixados em sua configuração padrão.

Para a projeção do mapa resultante, através do QGIS foi selecionada e recortada uma área da América do Sul que exibisse todo o litoral brasileiro, de acordo com o objetivo do trabalho. Após a projeção realizada pelo Maxent, os mapas foram novamente editados no QGIS para uma melhor visualização, de modo que apresentasse um bom contraste entre as cores da escala de adequabilidade, e fronteiras e siglas das unidades federativas do Brasil.

2.4 VALIDAÇÃO

O desempenho e significância estatística dos ENMs podem ser validados através de uma variedade de métricas, e visto que submeter-se a apenas uma leva a resultados equivocados, recomenda-se combinar ao menos duas (KONOWALIKI; NOSOL, 2021). Logo, para a validação de ambos os modelos, foram utilizadas as métricas de área sob a curva (AUC), e o índice de Boyce contínuo (CBI) (HIRZEL *et al.* 2006).

A AUC é provavelmente a métrica mais usada, adotada como padrão na validação de ENMs (JIMÉNEZ-VALVERDE, 2012; KONOWALIKI; NOSOL, 2021),

incluindo o Maxent, que em sua modelagem automaticamente gera o gráfico de característica de operação do receptor (ROC), utilizado para calcular a AUC, apesar de sua interpretação por vezes ser imprecisa em algoritmos de ENMs de dados de apenas presença (como o próprio Maxent) (SCHMIDT; LEWISON; SWARTS, 2020). Ela varia em uma escala de 0 a 1, onde 0,5 representa um resultado do nível de um modelo completamente aleatório, e 1 representa um modelo perfeito (HIRZEL *et al.* 2006; SCHMIDT; LEWISON; SWARTS, 2020).

O CBI, por outro lado, é considerado uma das métricas mais apropriadas para avaliar modelos de algoritmos preditivos de apenas presença (MANZOOR; GRIFFITHS; LUKAC, 2018), logo, bem adequado para a avaliação das modelagens do Maxent. Ele varia em uma escala de -1 a 1, onde valores negativos representam um resultado pior do que um modelo aleatório, 0 um resultado do nível de um modelo completamente aleatório, e 1 representa um modelo perfeito (HIRZEL *et al.* 2006; SCHMIDT; LEWISON; SWARTS, 2020). Ele foi calculado no R com o pacote “ecospat” (DI COLA *et al.* 2017), através da fórmula “ecospat.boyce”, que concede a escolha entre 3 métodos para a computação da correlação: o coeficiente de Spearman, o coeficiente de Pearson, e o coeficiente de Kendall.

O coeficiente de Spearman é o método padrão no cálculo do CBI, entretanto os outros coeficientes podem ser mais informativos sobre a acurácia dos modelos (BROENNIMANN *et al.* 2014). O CBI foi aqui, a fim de maior substancialidade, calculado com todos os 3 coeficientes. A métrica foi também a principal determinante na escolha dos modelos finais, comparando as projeções de diferentes valores do parâmetro “*regularization multiplier*” do Maxent (0,5; 1; 2; e 4), e selecionando as que obtiveram melhor resultado (RADOSAVLJEVIC; ANDERSON, 2014). Este parâmetro controla o quão localizada é a distribuição no modelo: valores maiores projetam regiões de adequabilidade de forma mais alastrada, enquanto valores menores projetam as regiões de adequabilidade de forma mais contida e próximas dos pontos de ocorrência reais.

3 RESULTADOS

Verifica-se que tanto para *Holothuria grisea* quanto para *Crassostrea tulipa* os modelos com o parâmetro “*regularization multiplier*” no valor 2 obtiveram os melhores resultados de desempenho na métrica de avaliação índice de Boyce contínuo (CBI)

(tabelas 4 e 5), tendo pelo menos dois métodos de computação da correlação (coeficientes de Spearman, Pearson e Kendall) maiores do que todos os outros modelos. Sendo assim, foram selecionados estes modelos (projetados com o valor 2 neste parâmetro) para as análises do restante do trabalho, considerando que eles expressaram um melhor desempenho estatístico quando comparados aos modelos projetados com outros valores para o parâmetro.

3.1 HOLOTHURIA GRISEA

Para o modelo final projetado para a espécie *Holothuria grisea* (média das 10 réplicas), o valor da área sob a curva (AUC) foi de 0,990 (figura 3), e do índice de Boyce contínuo (CBI) foi de 0,990, 0,862, e 0,931, para os coeficientes de Spearman, Pearson, e Kendall, respectivamente (tabela 4). Estes resultados demonstram que o modelo obteve bom desempenho estatístico, visto que em ambas as métricas a validação é dada para valores próximos de 1 (HIRZEL *et al.* 2006; SCHMIDT; LEWISON; SWARTS, 2020).

Na figura 4 está a representação gráfica do modelo com escala de cores, onde é possível conferir as regiões mais ambientalmente adequadas para *H. grisea*, segundo sua predição de nicho realizada pelo algoritmo Maxent. De acordo com a projeção, estas regiões estariam no Nordeste e no Sudeste: na costa dos estados de São Paulo ao Espírito Santo, de Sergipe ao Alagoas, e da Paraíba à costa leste do Maranhão.

Este resultado corrobora com alguns dados, como o de que o Ceará (inclusive na zona prevista como adequada entre a Paraíba e o Maranhão) é o estado com as maiores densidades de *H. grisea*, onde já ocorre a pesca artesanal da mesma (PONTE; FEITOSA, 2019).

3.2 CRASSOSTREA TULIPA

O modelo final projetado para a espécie *Crassostrea tulipa* (média das 10 réplicas) obteve um valor de 0,996 na métrica de validação área sob a curva (AUC) (figura 5), e 0,928, 0,647, e 0,851 nos coeficientes do índice de Boyce contínuo (CBI) (Spearman, Pearson, e Kendall, respectivamente) (tabela 5). Em ambas as métricas houve um bom desempenho com significância estatística, visto que a validação é dada

para valores próximos de 1. Apesar do coeficiente de Pearson parecer baixo quando comparado aos outros valores (0,647), o CBI varia em uma escala de -1 a 1 (onde 0 representa um resultado do nível de um modelo aleatório), diferentemente da AUC, que varia de 0 a 1 (onde um valor de 0,5 representa um resultado do nível de um modelo aleatório) (HIRZEL *et al.* 2006; SCHMIDT; LEWISON; SWARTS, 2020).

Na figura 6 está a representação gráfica do modelo com escala de cores, onde é possível conferir as regiões mais ambientalmente adequadas para *C. tulipa*, segundo sua predição de nicho realizada pelo algoritmo Maxent.

Apesar de ser estatisticamente válida e significativa, a modelagem da espécie *C. tulipa* foi realizada com um baixo número de dados de ocorrência: a espécie ocorre predominantemente em mangues, mais adentro dos continentes (PAIXÃO *et al.* 2013), e as camadas de variáveis ambientais do Bio-ORACLE e do GEBCO estão disponíveis apenas para as regiões marinhas, o que exigiu uma filtragem de parte dos dados de ocorrência (que já era baixo, quando comparado aos de *Holothuria grisea*). Além disso, ainda que as variáveis ambientais relacionadas à salinidade tenham sido removidas desta modelagem, existem evidências de que a salinidade ideal para um maior crescimento de *C. tulipa* é de 20 a 25 (MACEDO *et al.* 2020), mais baixas do que a média marinha, onde apesar disto ela também consegue se desenvolver.

De acordo com a projeção, as regiões mais adequadas seriam no Nordeste, nos estados de Sergipe ao Alagoas, e do Piauí à costa leste do Pará. Embora existam as ressalvas já apresentadas, o resultado condiz em parte com os locais onde já existem cultivos artesanais da espécie, como os mangues amazônicos próximos às costas do Pará e do Maranhão (estados compreendidos na zona prevista como adequada entre o Piauí e o Pará) (LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; MACEDO *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018; PAIXÃO *et al.* 2013). No entanto, é conhecido também o cultivo no canal de Santa Cruz, em Pernambuco (CAVALCANTI, 2003), onde o modelo não previu alta adequabilidade.

4 DISCUSSÃO

Desde 2015 o número de pessoas em estado de subnutrição tem aumentado acentuadamente, e de acordo com a mais pessimista de uma série de projeções realizadas pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), até 2050 este número pode aumentar em 260 milhões, o que representa um

crescimento de 32% em comparação ao ano de 2018 (ano de início da projeção) (*Institute for Economics & Peace*, 2020). De acordo com este relatório do *Institute for Economics & Peace*, eventos como a pandemia de COVID-19 tensionaram os mercados alimentícios globais, limitando o acesso e a disponibilidade de alimentos em todo o mundo. Nestes cenários, o sofrimento humano é inevitável, e poderia até mesmo desencadear revoltas e guerras civis e internacionais (BOYD *et al.* 2020).

A aquicultura sustentável é uma indústria que, caso receba investimento, pode prover grandes quantidades de alimento: a retenção de proteína em animais aquáticos é consideravelmente maior do que em animais terrestres como gado e suínos, devido às diferentes particularidades de suas fisiologias (diferentes gastos energéticos com excretas e regulação térmica) (BOYD *et al.* 2020). Em Boyd *et al.* é apontado que para cada unidade de proteína consumida, a mesma quantidade (quilograma) de salmão produz o dobro de proteína que o gado, e que um hectare de terras possui capacidade para a produção de menos de 1 tonelada de gado, enquanto com a mesma área é possível cultivar mais de 100 toneladas de peixe por ano. Além disso, ainda neste trabalho é mencionado que cada quilograma de salmão produzido no lugar de gado representa uma redução de 27 quilogramas de dióxido de carbono (CO₂) lançada no ambiente, reduzindo assim a emissão de gases do efeito estufa. A redução de gases do efeito estufa é uma conhecida característica da aquicultura multitrófica integrada (IMTA), e possui uma grande importância visto que a indústria da produção de alimentos é responsável por um terço da emissão desses gases (BOYD *et al.* 2020). Ainda em Boyd *et al.*, é concluído que a aquicultura em regiões costeiras e de *offshore* (consequentemente com espécies de água salgada) é ainda mais produtiva, e que esforços combinados deveriam ser feitos com o intuito de diversificar o número de espécies cultivadas e assim, talvez eliminar a produção de espécies que apesar de eficientes na aquicultura são exóticas em certas regiões do mundo onde são cultivadas.

A IMTA produz alimento usando menores quantidades de recursos naturais e energia enquanto ainda gera serviços ecossistêmicos: quando bem balanceada, ela pode até mesmo sequestrar carbono em vez de apenas reduzir a emissão, além de apresentar outros benefícios como a redução do desperdício de nutrientes e resíduos, redução dos requisitos alimentares, e a já citada maior produtividade quando comparada a produção de animais terrestres (BOYD *et al.* 2020; ZAMORA *et al.* 2018). O cultivo de animais de níveis tróficos mais baixos como os bivalves e as holotúrias

na IMTA é uma crescente tendência mundial, pois estes organismos são detritívoros e se alimentam dos resíduos orgânicos gerados pelos cultivos adjuntos, gerando um sistema com alto nível de integração entre as espécies onde se tem um ganho de produtividade e redução de impacto ambiental (BOYD *et al.* 2020; VALENTI *et al.* 2021a; VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020; ZAMORA *et al.* 2018).

Já o Brasil, enquanto o mundo beira crises climáticas e de escassez alimentar e pesqueira, de modo geral se encontra não em forma de resistência, mas de maneira oposta: sustentando e favorecendo medidas e diretrizes que intentam apenas o lucro imediato, ignorando os custos futuros para reparação (FEARNSIDE, 2016; LATINI *et al.* 2021; LIMA JR, 2012), e ainda em contraposição às demandas ambientais e sociais – os outros dois pilares da aquicultura sustentável (DE OLIVEIRA, 2015; VALENTI, 2002) – como no caso da produção de animais exóticos. Desta forma, fica entendido que muitas das políticas atuais, de maneira inconstitucional, incitam à exploração desordenada de recursos e faltam com o dever de preservar e defender o meio ambiente para as presentes e futuras gerações (FEARNSIDE, 2016; LATINI *et al.* 2021; LIMA JR, 2012).

O risco da introdução de espécies invasoras trazido pela aquicultura de espécies exóticas pode ser contido pela preferência do cultivo de espécies nativas, porém estas geram um lucro inferior devido ao seu pacote tecnológico menos desenvolvido e, logo, necessitam de um atrativo para que os produtores não enxerguem apenas como um investimento arriscado (RODRIGUES *et al.* 2012). Dito isto, as espécies nativas *Holothuria grisea* e *Crassostrea tulipa* são excelentes candidatas para uma política de pesquisa e desenvolvimento visando um retorno produtivo na aquicultura, especialmente na IMTA, e as numerosas vantagens existentes no cultivo dessas espécies, portanto, poderão ser desfrutadas se incentivadas a partir de estímulos como os que as regulamentações destes mercados trariam, além de mais estudos focados em aprimorar seus pacotes tecnológicos, tornando seus cultivos mais acessíveis e mais produtivos com menores ameaças ao meio ambiente, e desta forma estimulando investimento socioeconômico no setor da aquicultura sustentável (BOYD *et al.* 2020; VALENTI *et al.* 2021a; VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020; ZAMORA *et al.* 2018). Assim, os resultados aqui relatados fornecem um pequeno incremento aos pacotes tecnológicos dessas espécies, e podem servir como indicativos para nortear a escolha de futuros locais de cultivo.

Para *H. grisea*, a regulamentação e incentivo da aquicultura de holotúrias tanto nas regiões onde ocorre a pesca artesanal (como no Ceará) quanto nas regiões que demonstram ser ambientalmente promissoras para esta espécie nativa, poderiam alavancar seu potencial econômico como uma nova fonte de alimento fruto do mar, enquanto diminuiriam os impactos da sobrepesca, que já indicam sinais (PONTE; FEITOSA, 2019). Além do emprego no setor alimentício, essa espécie pode ter grande importância na indústria farmacêutica, com uma eventual capacidade de extração comercial do composto heparinóide (VALENTI *et al.* 2021a). O potencial econômico é grande também do ponto de vista da exportação, dado que há uma grande demanda do mercado asiático por holotúrias, onde já são mais consumidas devido às suas propriedades bioquímicas veneradas pela medicina tradicional oriental (CHEN *et al.* 2005; PEREIRA *et al.* 2018; PONTE; FEITOSA, 2019; SUN *et al.* 2008). Além disso, é cada vez mais claro o impacto positivo que a ciclagem de nutrientes realizada por holotúrias desempenha na produtividade primária bentônica tanto em ambientes temperados quanto tropicais (ZAMORA *et al.* 2018), e a espécie *H. grisea* pode ser cultivada na IMTA associada com peixes, camarões e moluscos (VALENTI *et al.* 2021a), provendo todos esses benefícios.

Assim como para *H. grisea*, a regulamentação e incentivo do cultivo da espécie *C. tulipa* nas regiões onde se prevê uma alta produtividade (levando em conta as ressalvas apresentadas nos resultados) poderiam impulsionar a economia em conjunto com uma nova e ascendente fonte de alimento nutritivo (CAVALCANTI, 2003; LAMEIRA SILVA *et al.* 2020; OLIVEIRA *et al.* 2018), enquanto se mitigariam os danos e riscos do cultivo da espécie exótica *Crassostrea gigas* ao reduzir sua prioridade: além de nativa, *C. tulipa* alcança um tamanho maior. Um crescimento no cultivo de ostras ampliaria ainda, fora o mercado alimentar, a produção de carbonato de cálcio, subproduto derivado das conchas que possui valor econômico em diversas indústrias, como as de materiais de construção, suplementos alimentares, farmacêutica, alimentação de animais, produção de plástico, fertilizantes, dentre outras (H SILVA *et al.* 2019; VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020). A crescente tendência do cultivo de bivalves em sistemas de IMTA (VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020) tem sido favorável, com resultados promissores quando combinadas com o camarão marinho *Litopenaeus vannamei*, por exemplo (VALENTI *et al.* 2021a). Isto ocorre pois os bivalves trazem ainda diversos serviços ecossistêmicos que podem ser muito bem aproveitados nos sistemas integrados, como ciclagem de nutrientes,

acumulação bioquímica do nitrogênio (o que reduz a eutrofização), sequestro de carbono, redução da erosão, e outros (VALENTI *et al.* 2021a; VAN DER SCHATTE OLIVIER *et al.* 2020).

Em uma última ressalva, apesar da IMTA cientificamente ter esse amplo amparo e validação, é preciso levar em conta que estes sistemas também não são completamente benéficos, pois cultivos em larga escala estão suscetíveis a adversidades como impactos genéticos e proliferação de doenças (ZAMORA *et al.* 2018). A IMTA condiz com os conceitos da economia circular – importante do ponto de vista da sustentabilidade –, e definitivamente terá um papel vital no desenvolvimento de produções sustentáveis de aquicultura nas próximas décadas (BOYD *et al.* 2020), porém esses sistemas devem ser implementados controladamente e com auxílio de pesquisas, a fim de garantir a qualidade dos produtos e reduzir as chances de impactos negativos ao explorar este potencial econômico (ZAMORA *et al.* 2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora as análises de adequabilidade ambiental das espécies *Holothuria grisea* e *Crassostrea tulipa* tenham sido realizadas com êxito para toda a extensão do litoral brasileiro, tanto as ressalvas apontadas para *C. tulipa* quanto as políticas nacionais atuais em relação à criação de espécies exóticas clamam por mais estudos.

Mesmo com um bom desempenho estatístico, o modelo de *C. tulipa* não está com uma projeção ideal: ela traria resultados mais precisos se realizada com todas as variáveis impactantes (nesta projeção foram excluídas as relacionadas à salinidade) e com mais pontos de ocorrência, incluindo aqueles desconsiderados neste trabalho por estarem fora das camadas de dados das variáveis ambientais. Para tanto, é necessário se adquirir os respectivos dados de variáveis ambientais destes pontos de ocorrência desconsiderados, que se localizam principalmente em mangues brasileiros e africanos. Logo, ao levar estas informações em consideração em análises e outros estudos, deve-se usar o modelo de *C. tulipa* apenas como indicativo das proximidades possivelmente mais adequadas.

No Brasil atual, cada vez mais as políticas contradizem os princípios ambientalistas e da sustentabilidade. A facilitação e encorajamento da produção de espécies exóticas é um exemplo disso, e a melhor maneira do âmbito acadêmico se

opor a essas políticas é cientificamente, através de estudos e pesquisas que sirvam de argumentos em prol do cultivo de espécies nativas enquanto se alertam para os riscos trazidos pelas espécies com potencial invasivo.

Sendo assim, levando em conta a possibilidade da aquicultura multitrófica integrada (IMTA) e os seus benefícios e adversidades, caso outras pesquisas com essas e diferentes espécies nativas e de níveis tróficos mais baixos forem encorajadas em vista do objetivo de estimular a produção de espécies atualmente impopulares que possam integrar ou substituir os cultivos de animais exóticos sem reduções de produtividade e rendimento financeiro, seria possível esperar grandes retornos de todos os âmbitos da aquicultura sustentável: econômico, ambiental e social.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Jorge *et al.* Bio-ORACLE v2. 0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 3, p. 277-284, 2018.

Bio-ORACLE. Disponível em: <https://www.bio-oracle.org>. Acesso em 26 de novembro de 2021.

BOYD, Claude E. *et al.* Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 3, p. 578-633, 2020.

BROENNIMANN, Olivier *et al.* Package 'ecospat'. **WWW document**. 2014. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/ecospat/index.html> (acesso em 04 de maio de 2022).

BUCKUP, Paulo Andreas; MENEZES, Naércio Aquino; GHAZZI, Miriam Sant'Anna. **Catálogo das espécies de peixes de água doce do Brasil**. Rio de Janeiro: Museu Nacional, 2007.

CAVALCANTI, André Dias. Monitoramento da contaminação por elementos traço em ostras comercializadas em Recife, Pernambuco, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 19, p. 1545-1551, 2003.

CHEN, Jiaxin *et al.* Present status and prospects of sea cucumber industry in China. **FAO Fisheries technical paper**, p. 25-38, 2005.

ČÍHAL, Lukáš; FIALOVÁ, Lucie; PLÁŠEK, Vítězslav. Species distribution model for *Buxbaumia viridis*, identifying new areas of presumed distribution in the Czech Republic. **Acta Musei Silesiae. Scientiae Naturales**, v. 69, n. 1, p. 21-28, 2020.

DE OLIVEIRA, Rafael C. O panorama da aqüicultura no Brasil: a prática com foco na sustentabilidade. **Revista INTERTOX de toxicologia, risco ambiental e sociedade**, v. 2, n. 1, p. 71-89, 2015.

DE OLIVEIRA, Umberto Diego Rodrigues *et al.* Modeling impacts of climate change on the potential habitat of an endangered Brazilian endemic coral: Discussion about deep sea refugia. **Plos one**, v. 14, n. 5, p. e0211171, 2019.

DI COLA, Valeria *et al.* ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions. **Ecography**, v. 40, n. 6, p. 774-787, 2017.

DUENAS, Manuel-Angel *et al.* The threat of invasive species to IUCN-listed critically endangered species: A systematic review. **Global Ecology and Conservation**, v. 26, p. e01476, 2021.

EFFROSYNIDIS, Dimitrios *et al.* Species Distribution Modelling via Feature Engineering and Machine Learning for Pelagic Fishes in the Mediterranean Sea. **Applied Sciences**, v. 10, n. 24, p. 8900, 2020.

FAO, Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture 2018. Meeting the sustainable development goals. **FAO**, Rome, 2018.

FAO, Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. **FAO**, Rome, 2020.

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FEARNSIDE, Philip M. Brazilian politics threaten environmental policies. **Science**, v. 353, n. 6301, p. 746-748, 2016.

GBIF: The Global Biodiversity Information Facility (2021) *What is GBIF?*. Disponível em: <https://www.gbif.org/what-is-gbif>. Acesso em: 27 de novembro de 2021.

GBIF.org (27 November 2021) GBIF Occurrence Download
<https://doi.org/10.15468/dl.9dxht7>

GBIF.org (27 November 2021) GBIF Occurrence Download
<https://doi.org/10.15468/dl.kt3wpj>

GEBCO Compilation Group. GEBCO 2021 Grid (doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cffe053-6c86abc09f8f), 2021.

GEBCO. Disponível em <https://www.gebco.net>. Acesso em 10 de novembro de 2021.

GENTILI, Rodolfo *et al.* Invasive alien species and biodiversity: Impacts and management. **Biodiversity**, v. 22, n. 1-2, p. 1-3, 2021.

GIOVANELLI, João Gabriel Ribeiro *et al.* Natural history supporting the choice of predictor variables for species distribution models: protocols and subsidies for amphibian conservation plans. 2019.

GRANADOS-MARTÍNEZ, Sofía *et al.* Niche Contraction of an Endangered Frog Driven by the Amphibian Chytrid Fungus. **EcoHealth**, v. 18, n. 1, p. 134-144, 2021.

H SILVA, Thamyres *et al.* The potential use of oyster shell waste in new value-added by-product. **Resources**, v. 8, n. 1, p. 13, 2019.

HIRZEL, Alexandre H. *et al.* Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. **Ecological modelling**, v. 199, n. 2, p. 142-152, 2006.

IUCN. Guidelines for the Prevention of Biodiversity Loss Caused by Alien Invasive Species, 2000.

IGARASHI, Marco Antonio. PERSPECTIVAS E NOVAS TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE LAGOSTAS PALINURÍDEOS. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 6, n. 4, p. 493-502, 2008.

Institute for Economics & Peace. Ecological Threat Register 2020: Understanding Ecological Threats, Resilience and Peace, Sydney, September 2020. Disponível em: <http://visionofhumanity.org/reports>. (acesso em 29 de junho de 2022).

JIMÉNEZ-VALVERDE, Alberto. Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, n. 4, p. 498-507, 2012.

KONOWALIK, Kamil; NOSOL, Agata. Evaluation metrics and validation of presence-only species distribution models based on distributional maps with varying coverage. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2021.

LAMEIRA SILVA, Osnan Lennon *et al.* Effect of environmental factors on the fatty acid profiles and physicochemical composition of oysters (*Crassostrea gasar*) in Amazon estuarine farming. **Aquaculture Research**, v. 51, n. 6, p. 2336-2348, 2020.

LATINI, A. O. *et al.* Brazil's new fish farming Decree threatens freshwater conservation in South America. **Biological Conservation**, v. 263, p. 109353, 2021.

LIMA JR, Dilermando Pereira *et al.* Aquicultura, política e meio ambiente no Brasil: Novas propostas e velhos equívocos. **Nat Conservação**, v. 10, n. 1, p. 88-91, 2012.

LIN, Dongyu; FOSTER, Dean P.; UNGAR, Lyle H. VIF regression: a fast regression algorithm for large data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 106, n. 493, p. 232-247, 2011.

- MACEDO, A. R. G. *et al.* Crescimento e viabilidade econômica da ostra nativa *Crassostrea gasar* (Adanson, 1757) cultivadas em dois sistemas. **CEP**, v. 88034, p. 000, 2020.
- MANZOOR, Syed Amir; GRIFFITHS, Geoffrey; LUKAC, Martin. Species distribution model transferability and model grain size—finer may not always be better. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2018.
- NABOUT, João Carlos *et al.* Distribuição geográfica potencial de espécies americanas do caranguejo "violinista" (*Uca* spp) (Crustacea, Decapoda) com base em modelagem de nicho ecológico. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 99, p. 92-98, 2009.
- MENEZES, Naércio Aquino *et al.* (Ed.). **Catálogo das espécies de peixes marinhos do Brasil**. São Paulo: Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo, 2003.
- NAIMI, Babak; ARAÚJO, Miguel B. sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. **Ecography**, v. 39, n. 4, p. 368-375, 2016.
- NAIMI, Babak *et al.* Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? **Ecography**, v. 37, n. 2, p. 191-203, 2014.
- NAIMI, Babak. usdm: Uncertainty analysis for species distribution models, R Software Package, 2014
- OLIVEIRA, Luiz Fernando Silva *et al.* Influence of the proximity to the ocean and seasonality on the growth performance of farmed mangrove oysters (*Crassostrea gasar*) in tropical environments. **Aquaculture**, v. 495, p. 661-667, 2018.
- PAIXÃO, Leonardo *et al.* Effects of salinity and rainfall on the reproductive biology of the mangrove oyster (*Crassostrea gasar*): Implications for the collection of broodstock oysters. **Aquaculture**, v. 380, p. 6-12, 2013.
- PEREIRA, Vanessa Alves *et al.* Identification and characterization of microsatellite loci in West Atlantic sea cucumber *Holothuria grisea* (Selenka 1867). **Journal of genetics**, v. 97, n. 5, p. 1363-1369, 2018.
- PETERSON, A. Townsend; SOBERÓN, Jorge. Species distribution modeling and ecological niche modeling: getting the concepts right. **Natureza & Conservação**, v. 10, n. 2, p. 102-107, 2012.
- PHILLIPS, Steven J.; ANDERSON, Robert P.; SCHAPIRE, Robert E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological modelling**, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.
- PHILLIPS, Steven J.; ANDERSON, Robert P.; SCHAPIRE, Robert E. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.3). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2021-9-23.

PONTE, Isabela de Abreu Rodrigues; FEITOSA, Caroline Vieira. Evaluation of an unreported and unregulated sea cucumber fishery in eastern Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v. 167, p. 1-8, 2019.

QGIS.org. QGIS Geographic Information System. QGIS Association, disponível em: <http://www.qgis.org>, 2021.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>, 2021.

RADOSAVLJEVIC, Aleksandar; ANDERSON, Robert P. Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. **Journal of biogeography**, v. 41, n. 4, p. 629-643, 2014.

RESENDE, Emiko Kawakami de. Pesquisa em rede em aquicultura: bases tecnológicas para o desenvolvimento sustentável da aqüicultura no Brasil. Aquabrazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. SPE, p. 52-57, 2009.

RODRIGUES, Luiza Sidônio *et al.* Panorama da aquicultura no Brasil: desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, n. 35, mar. 2012, p. 421-463, 2012.

SANCHES, Fabio Henrique Carretero *et al.* Aggressiveness overcomes body-size effects in fights staged between invasive and native fish species with overlapping niches. **PLoS One**, v. 7, n. 1, p. e29746, 2012.

SCHMIDT, Greta M.; LEWISON, Rebecca L.; SWARTS, Hilary M. Identifying landscape predictors of ocelot road mortality. **Landscape Ecology**, v. 35, n. 7, p. 1651-1666, 2020.

SUN, Guo-Quan *et al.* Two new cytotoxic nonsulfated pentasaccharide holostane (= 20-hydroxylanostan-18-oic acid γ -lactone) glycosides from the sea cucumber *Holothuria grisea*. **Helvetica Chimica Acta**, v. 91, n. 8, p. 1453-1460, 2008.

TYBERGHEIN, Lennert *et al.* Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. **Global ecology and biogeography**, v. 21, n. 2, p. 272-281, 2012.

UTHICKE, Sven; CONAND, Chantal. Local examples of beche-de-mer overfishing: An initial summary and request for information. **SPC beche-de-mer Information Bulletin**, v. 21, p. 9-14, 2005.

VALENTI, Wagner C. *et al.* Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, p. 100611, 2021a.

VALENTI, Wagner C. *et al.* Aquicultura no Brasil: uma indústria de 1 bilhão de dólares. **Panorama da Aqüicultura**, v. 30, n. 182, p. 33-49, 2021b.

VALENTI, Wagner C. *et al.* Indicators of sustainability to assess aquaculture systems. **Ecological indicators**, v. 88, p. 402-413, 2018.

VALENTI, Wagner Cotroni. Aquicultura sustentável. In: **Congresso de Zootecnia**, p. 111-118, 2002

VAN DER SCHATTE OLIVIER, Andrew *et al.* A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 1, p. 325, 2020.

WARREN, Dan L.; SEIFERT, Stephanie N. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. **Ecological applications**, v. 21, n. 2, p. 335-342, 2011.

ZAMORA, Leonardo Nicolas *et al.* Role of deposit-feeding sea cucumbers in integrated multitrophic aquaculture: progress, problems, potential and future challenges. **Reviews in Aquaculture**, v. 10, n. 1, p. 57-74, 2018.

ZENNI, Rafael Dudeque *et al.* The economic costs of biological invasions around the world. **NeoBiota**, 2021, núm. 67, p. 1-9, 2021.

TABELAS

Tabela 1 - Variáveis ambientais, e os valores de cada variável, somando 72 camadas de dados (não incluindo a camada batimétrica do GEBCO, de valor único, a qual totaliza 73 camadas).

Variáveis ambientais (excluindo a camada batimétrica)	Valores para cada variável (excluindo a camada batimétrica)
Temperatura	Máximas
Salinidade	Médias
Velocidade das correntes	Mínimas
Nitrato	Amplitudes
Fosfato	Máximas a longo prazo (média das máximas anuais)
Silicato	Mínimas a longo prazo (média das mínimas anuais)
Oxigênio molecular dissolvido	–
Ferro	–
Clorofila	–
Fitoplâncton	–
Produtividade primária	–
Luz no fundo	–

Tabela 2 - Camadas de valores de variáveis ambientais que o teste de fator de inflação de variância (VIF), feito com um limiar de correlação de 0,8, resultou como sem multicolinearidade, para serem utilizadas na modelagem da espécie *Holothuria grisea*.

Camadas sem multicolinearidade (teste VIF com todas as camadas)	
Batimetria	Amplitudes de nitrato
Mínimas de clorofila	Amplitudes de fosfato
Amplitudes de clorofila	Mínimas a longo prazo de produtividade primária
Mínimas de velocidade das correntes	Amplitudes de produtividade primária
Amplitudes de velocidade das correntes	Médias de salinidade
Mínimas a longo prazo de oxigênio molecular dissolvido	Amplitudes de salinidade
Amplitudes de oxigênio molecular dissolvido	Máximas de silicato
Mínimas de ferro	Amplitudes de silicato
Amplitudes de ferro	Mínimas a longo prazo de temperatura
Mínimas de luz no fundo	Amplitudes de temperatura
Amplitudes de luz no fundo	–

Tabela 3 - Camadas de valores de variáveis ambientais que o teste de fator de inflação de variância (VIF), feito sem as camadas relacionadas à variável salinidade e com um limiar de correlação de 0,8, resultou como sem multicolinearidade, para serem utilizadas na modelagem da espécie *Crassostrea tulipa*.

Camadas sem multicolinearidade excluindo a salinidade (teste VIF após excluir as camadas relacionadas à variável salinidade)	
Batimetria	Mínimas de luz no fundo
Máximas a longo prazo de clorofila	Amplitudes de luz no fundo
Mínimas de clorofila	Amplitudes de fosfato
Mínimas de velocidade das correntes	Mínimas de produtividade primária
Amplitudes de velocidade das correntes	Amplitudes de produtividade primária
Mínimas a longo prazo de oxigênio molecular dissolvido	Máximas de silicato
Amplitudes de oxigênio molecular dissolvido	Amplitudes de silicato
Mínimas de ferro	Mínimas a longo prazo de temperatura
Amplitudes de ferro	Amplitudes de temperatura

Tabela 4 - Índice de Boyce contínuo (CBI) dos modelos da espécie *Holothuria grisea*, onde é possível conferir que o modelo com o parâmetro “*regularization multiplier*” no valor 2 obteve o melhor desempenho estatístico.

Índice de Boyce contínuo (CBI) dos modelos da espécie *Holothuria grisea*

Valor do parâmetro “ <i>regularization multiplier</i> ”		Método de computação da correlação		
		Coefficiente de Spearman	Coefficiente de Pearson	Coefficiente de Kendall
0,5 1 2 4	0,5	0,958	0,874	0,865
	1	0,975	0,814	0,893
	2	0,990	0,862	0,931
	4	0,964	0,780	0,868

Tabela 5 - Índice de Boyce contínuo (CBI) dos modelos da espécie *Crassostrea tulipa*, onde é possível conferir que o modelo com o parâmetro “*regularization multiplier*” no valor 2 obteve o melhor desempenho estatístico.

Índice de Boyce contínuo (CBI) dos modelos da espécie *Crassostrea tulipa*

Valor do parâmetro “ <i>regularization multiplier</i> ”		Método de computação da correlação		
		Coefficiente de Spearman	Coefficiente de Pearson	Coefficiente de Kendall
0,5 1 2 4	0,5	0,905	0,697	0,800
	1	0,851	0,627	0,685
	2	0,928	0,647	0,851
	4	0,699	0,545	0,548

FIGURAS

Figura 1 – Pontos de ocorrência da espécie *Holothuria grisea* após filtragem (n = 117), usados na modelagem.



Figura 2 – Pontos de ocorrência da espécie *Crassostrea tulipa* após filtragem (n = 21), usados na modelagem.

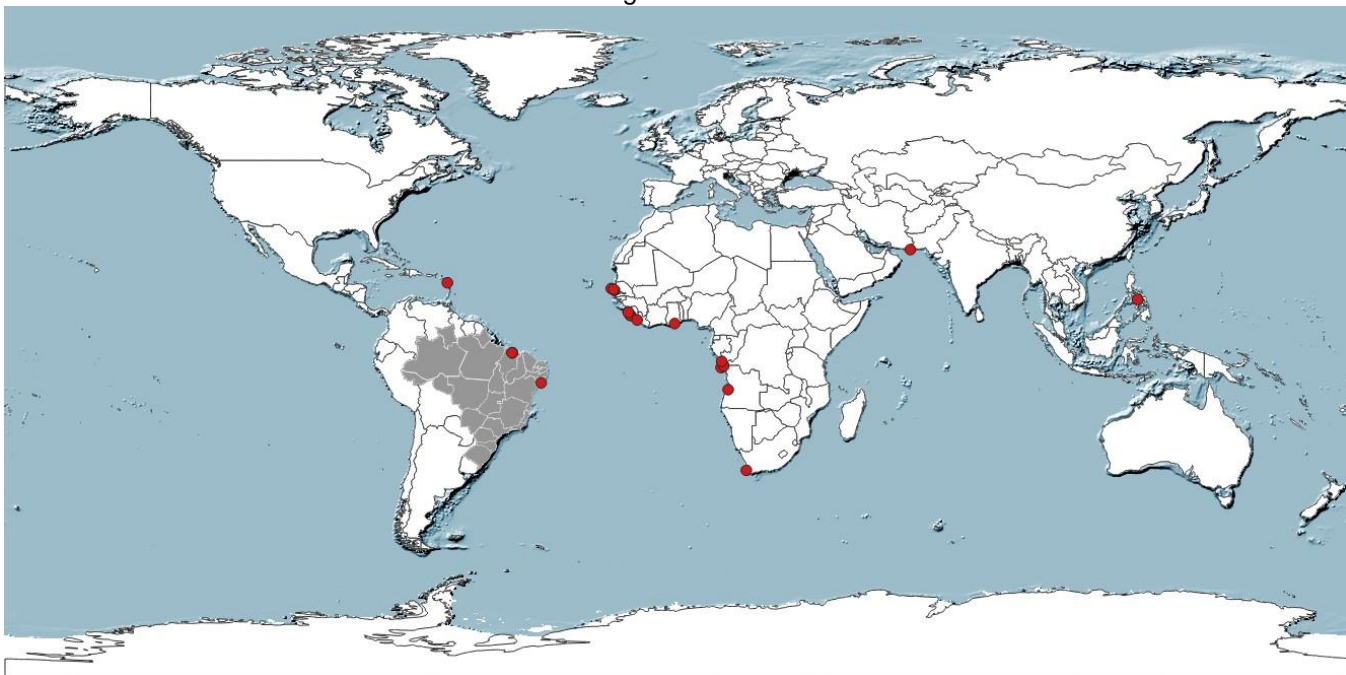


Figura 3 - Área sob a curva do modelo final (média das 10 réplicas) para a espécie *Holothuria grisea*.

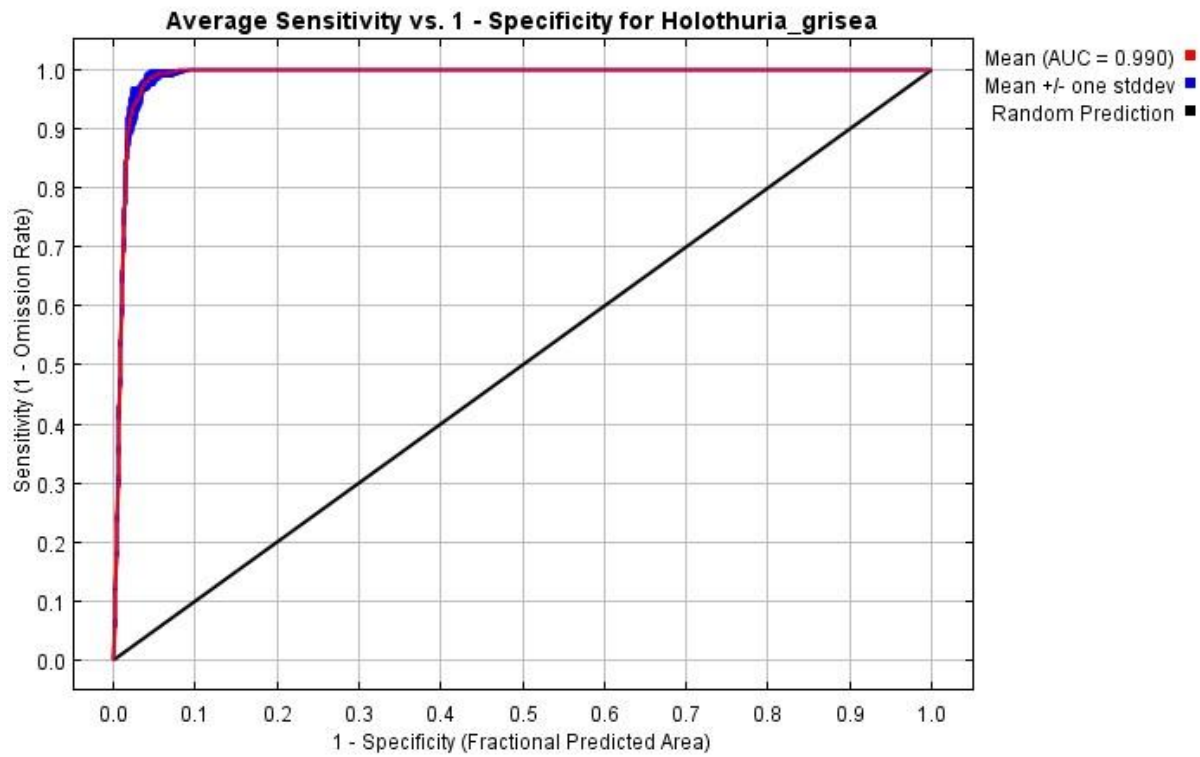


Figura 4 - Escala de cores de acordo com a adequabilidade ambiental prevista pelo modelo de predição de nicho ecológico para a espécie *Holothuria grisea*.

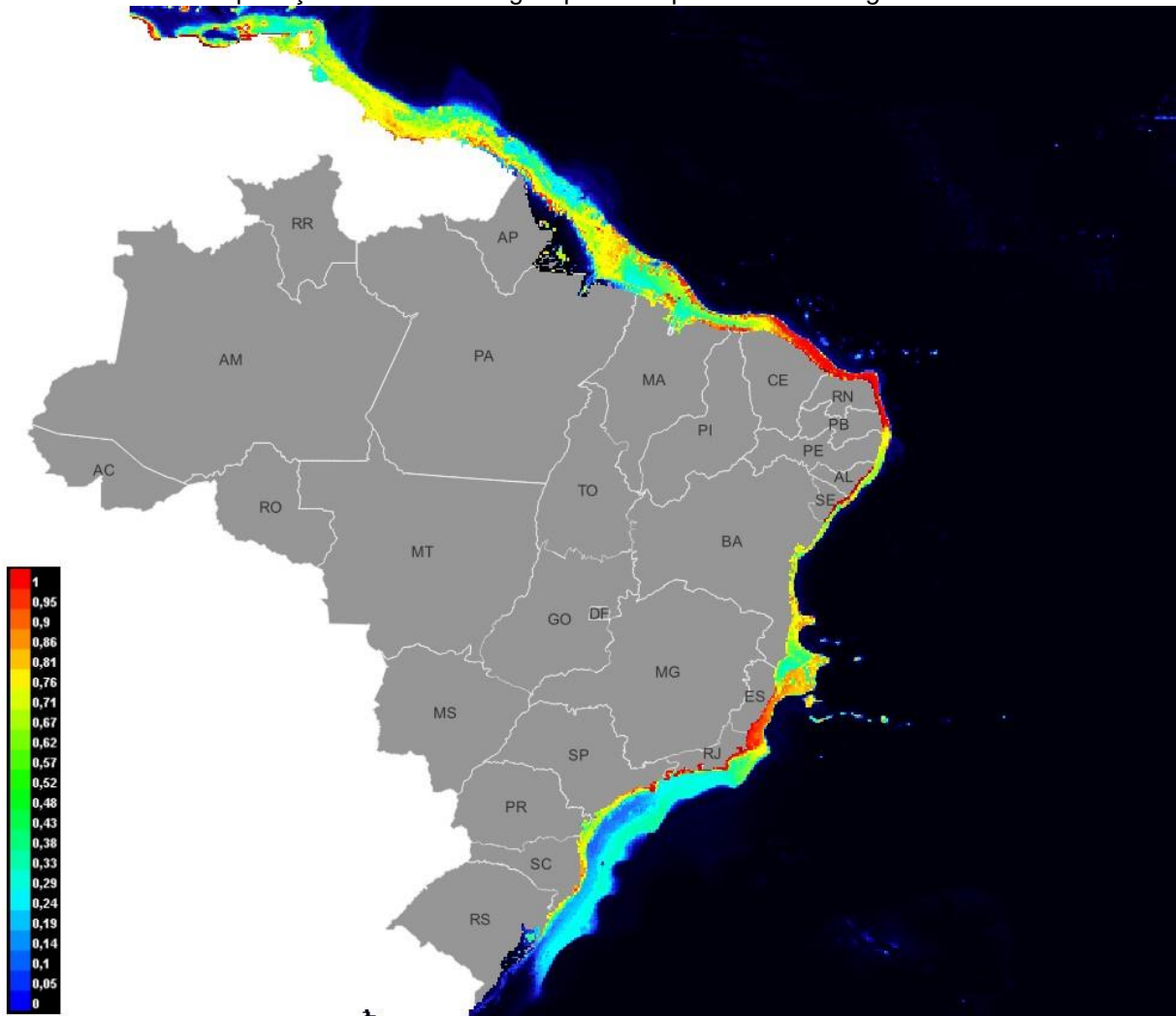


Figura 5 - Área sob a curva do modelo final (média das 10 réplicas) para a espécie *Crassostrea tulipa*.

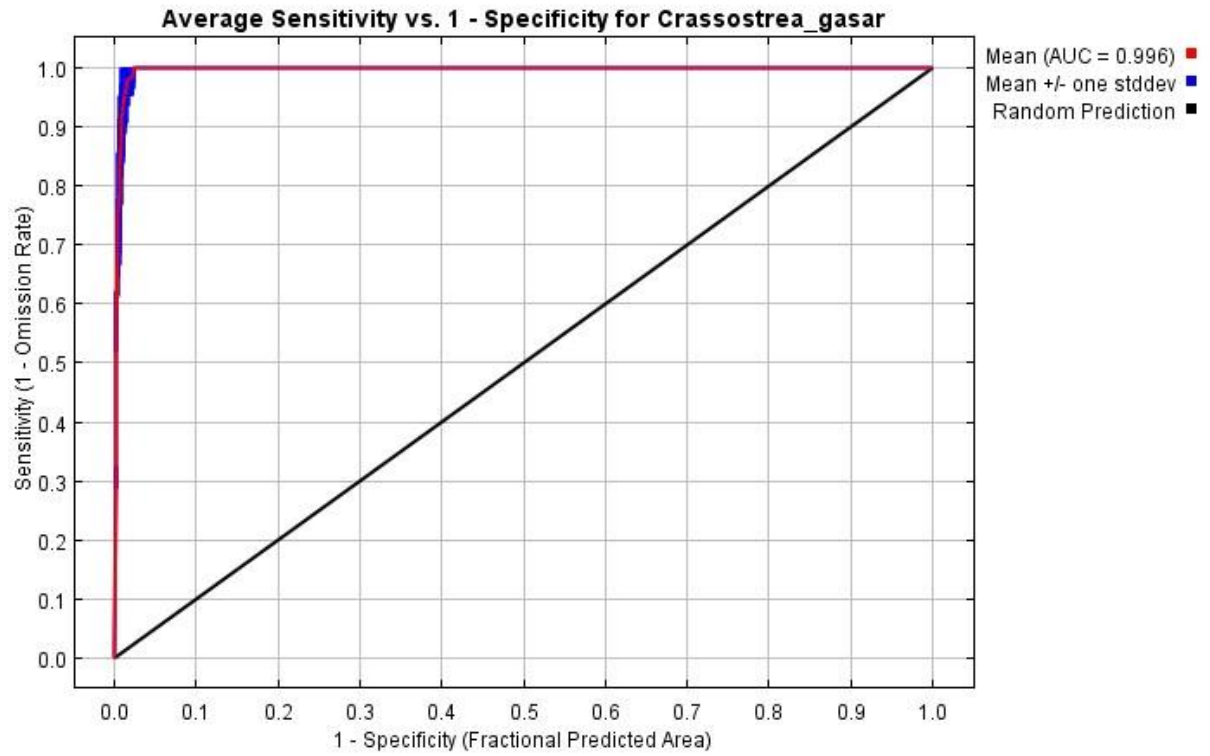
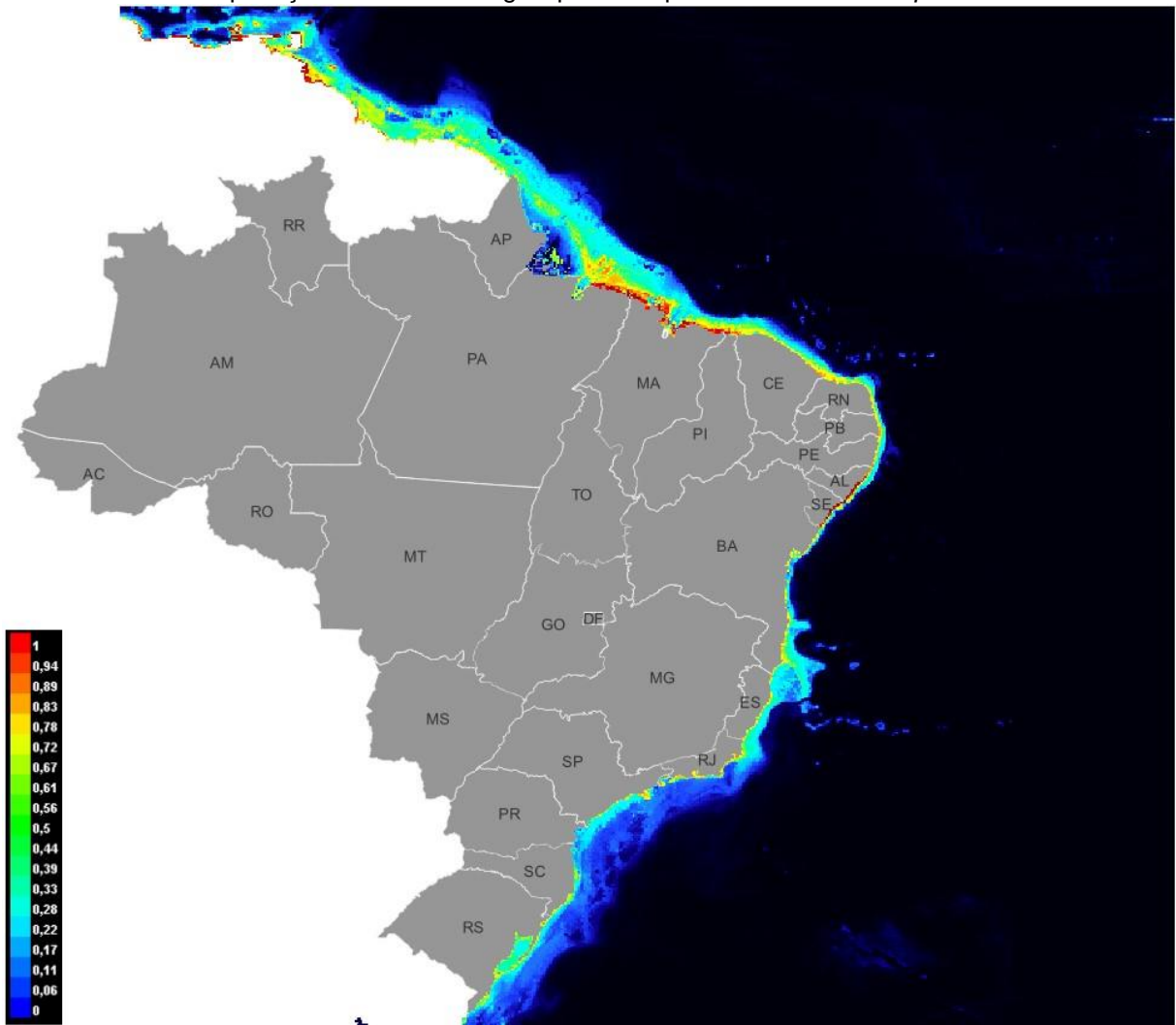


Figura 6 - Escala de cores de acordo com a adequabilidade ambiental prevista pelo modelo de predição de nicho ecológico para a espécie *Crassostrea tulipa*.



PARECER FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Discente: LUCAS FERREIRA DE SOUZA

Título: "Áreas ambientalmente adequadas para o cultivo das espécies de interesse econômico *Holothuria (halodeima) grisea (selenka, 1867) (holotúria)* e *Crassostrea tulipa (lamarck, 1819) (ostra)*, de acordo com modelagens de nicho ecológico (ENM)"

Orientador: Prof. Dr. Ivan Sergio Nunes Silva Filho

Curso/Habilitação: Bacharelado em Ciências Biológicas/Biologia Marinha

COMISSÃO EXAMINADORA	CONCEITO
Prof. Dr. Ivan Sergio Nunes Silva Filho	APROVADO
Profa. Dra. Tânia Marcia Costa	APROVADO

PARECER:

O TRABALHO ESTÁ BEM REDIGIDO E TEM DADOS RELEVANTES E INEDITOS O ALUNO RESPONDEU ADEQUADAMENTE AOS QUESTIONAMENTOS DA COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO FINAL:

A Comissão Examinadora abaixo assinada conclui que o discente **Lucas Ferreira de Souza** obteve o seguinte conceito:

APROVADO

REPROVADO

São Vicente, 19 de julho de 2022.


Prof. Dr. Ivan Sergio Nunes Silva Filho


Profa. Dra. Tânia Marcia Costa