



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS
CÂMPUS DO LITORAL PAULISTA

LUCAS JULIO AGNELLO

ANÁLISE DE VIABILIDADE POPULACIONAL DO ESTOQUE DE
TUBARÃO-AZUL (*Prionace glauca*) NO ATLÂNTICO SUL: um cenário natural

São Vicente - SP
2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”



INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS
CÂMPUS DO LITORAL PAULISTA

LUCAS JULIO AGNELLO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE POPULACIONAL DO ESTOQUE DE
TUBARÃO-AZUL (*Prionace glauca*) NO ATLÂNTICO SUL: Um cenário natural**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Biociências da UNESP – Campus do Litoral Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Ciências Biológicas, com habilitação em Biologia Marinha.

Orientador: Fabio Stucchi Vannucchi

Coorientador: Otto Bismarck Fazzano Gadig

São Vicente - SP
2025

A271a Agnello, Lucas Julio

Análise de viabilidade populacional do estoque de tubarão-azul (*Prionace glauca*) no Atlântico sul : um cenário natural / Lucas Julio Agnello. -- São Vicente, 2025

29 f. : tabs., fotos

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

Orientador: Fabio Stucchi Vannucchi

Coorientador: Otto Bismarck Fazzano Gadig

1. Biologia de conservação. 2. Tubarões. 3. Ecologia Modelos matemáticos. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo financiamento da minha bolsa de iniciação científica (Processo: 2024/18179-1), o que me auxiliou na conclusão deste trabalho. Sou extremamente grato ao meu orientador Fabio, que me acolheu no laboratório desde o primeiro dia e me mostrou uma área de pesquisa a qual nem sabia que existia e hoje sou apaixonado. Ao Laboratório de Modelagem Matemática de Processos Biológicos pelo apoio, especialmente à Ana Laura, por toda parceria no decorrer de todos esses anos, em sala de aula, escrevendo projeto, na monitoria e durante toda a execução do presente trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. Otto Bismarck Fazzano Gadig (IBCLP/UNESP), pela orientação e colaboração durante o trabalho, em especial na verificação e interpretação dos dados.

RESUMO

Os elasmobrânquios, que englobam a grande maioria dos peixes cartilaginosos, possuem uma ampla distribuição oceânica e atuam frequentemente como predadores de topo, desempenhando papéis ecológicos fundamentais sobre as comunidades onde habitam. A sobrepesca, direcionada especialmente a tubarões, constitui a principal ameaça a esses animais, levando a declínios populacionais acentuados em várias espécies. O tubarão-azul (*Prionace glauca*), de ampla ocorrência e classificado como Quase Ameaçado (NT) pela IUCN, é a espécie mais capturada pela pesca de espinhel no Atlântico Sul e lidera o comércio internacional de barbatanas. Diante desse cenário, este trabalho realizou uma Análise de Viabilidade Populacional (AVP) para o estoque do Atlântico sul de tubarão-azul, utilizando o software *Vortex* (versão 10.10.0), com o objetivo de projetar sua dinâmica populacional na ausência de pressão pesqueira e avaliar a ferramenta como alternativa para conservação do grupo. Foram compilados parâmetros demográficos, reprodutivos e de mortalidade específicos da região a partir da literatura e conversas com especialistas. O cenário base, modelado sob uma condição utópica sem pesca, produziu uma taxa intrínseca de crescimento (r) de 0,1959, equivalente a um crescimento populacional anual de 21,56% ($\lambda = 1,2156$), um tempo geracional médio de 9,1 anos e uma taxa líquida reprodutiva (R_0) de 6,695. Esses resultados demonstram um crescimento populacional natural robusto e são consistentes com análises demográficas anteriores baseadas em tabelas de vida, corroborando a validade do *Vortex* para modelos de elasmobrânquios. Foi realizada uma análise de sensibilidade focando na incerteza referente ao percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente. Verificou-se que o cenário base se situa na faixa de 40% a 50% de fêmeas reprodutivas. Contudo, dados de campo contendo o percentual de fêmeas grávidas em relação a fêmeas adultas na população indicam que valores reais podem ser superiores (60% a 70%), o que elevaria o crescimento anual projetado para um intervalo de 26,71% a 29,27%, indicando uma resiliência populacional natural ainda maior. Conclui-se que o *Vortex* é uma ferramenta viável e promissora para AVPs de tubarões, ao mesmo tempo que evidencia a necessidade crucial de estudos futuros para refinar a estimativa das taxas reprodutivas anuais para fêmeas, um parâmetro chave para a avaliação e gestão precisas da conservação do tubarão-azul no Atlântico Sul.

Palavras-chave: Tubarão-azul; Conservação de animais marinhos; Modelo computacional *Vortex*; Análises demográficas.

ABSTRACT

Elasmobranchs, which encompass the vast majority of cartilaginous fish, have a wide oceanic distribution and often act as top predators, playing fundamental ecological roles in the communities they inhabit. Overfishing, especially targeting sharks, constitutes the main threat to these animals, leading to sharp population declines in various species. The blue shark (*Prionace glauca*), widely distributed and classified as Near Threatened (NT) by the IUCN, is the most captured species by longline fisheries in the South Atlantic and leads the international fin trade. Given this scenario, this study conducted a Population Viability Analysis (PVA) for the South Atlantic stock of blue shark, using the Vortex software (version 10.10.0), aiming to project its population dynamics in the absence of fishing pressure and to evaluate the tool as an alternative for the conservation of the group. Demographic, reproductive, and mortality parameters specific to the region were compiled from the literature and expert consultations. The baseline scenario, modeled under a utopian no-fishing condition, produced an intrinsic growth rate (r) of 0.1959, equivalent to an annual population growth of 21.56% ($\lambda = 1.2156$), an average generation time of 9.1 years, and a net reproductive rate (R_0) of 6.695. These results demonstrate robust natural population growth and are consistent with previous demographic analyses based on life tables, corroborating the validity of Vortex for elasmobranch models. A sensitivity analysis was performed focusing on the uncertainty regarding the percentage of adult females reproducing annually. It was found that the baseline scenario falls within the range of 40% to 50% of reproductive females. However, field data containing the percentage of pregnant females relative to adult females in the population indicate that actual values may be higher (60% to 70%), which would increase the projected annual growth to a range of 26.71% to 29.27%, indicating an even greater natural population resilience. It is concluded that Vortex is a viable and promising tool for shark PVAs, while also highlighting the crucial need for future studies to refine the estimation of annual reproductive rates for females, a key parameter for the accurate assessment and conservation management of the blue shark in the South Atlantic.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
2.1. Espécie focal e área de estudo.....	11
2.2. Taxas vitais e estimativa populacional.....	11
2.3. Simulações numéricas.....	12
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. Ciclo de vida.....	13
3.2. Parâmetros do Cenário Base.....	14
3.3. Simulações do Cenário Base: efeito da população inicial.....	18
3.4. Simulações do Cenário Base: desempenho do modelo.....	20
3.5. Análise de sensibilidade.....	22
4. CONCLUSÃO.....	25
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1. INTRODUÇÃO

A classe dos Chondrichthyes, conhecidos também como peixes cartilagosos, apresenta mais de 1200 espécies registradas divididas em duas subclasses: Holocephali (quimeras) e Elasmobranchii (tubarões e raias). Esses animais estão distribuídos por todos os oceanos do planeta, sendo geralmente predadores de topo de cadeia. Dessa maneira, os elasmobrânquios, que compõem a grande maioria dos Chondrichthyes, são importantes elementos para o ecossistema que habitam. Uma eventual perda ou mesmo diminuição desses predadores no ambiente causaria potenciais mudanças na composição das comunidades em relação ao tamanho populacional de suas presas e do meio em si (BARRETO, 2015).

A pesca é sem dúvida a maior ameaça aos tubarões, mais especificamente a sobrepesca, que vem causando declínios significativos em suas populações ao redor do mundo (DENT; CLARKE, 2015). A estratégia de vida que inclui fecundidade baixa, maturidade sexual tardia e longevidade prolongada, influencia a maneira como os estoques podem ou não reagir às altas taxas de mortalidade provocadas pela pesca (SILVA; LESSA; SANTANA, 2021).

O tubarão-azul (*Prionace glauca*) é a espécie de elasmobrânquio mais capturada pela pesca de espinhel, principalmente na região do Atlântico Sul (CARVALHO et al., 2010). Essa espécie lidera o mercado mundial de barbatanas, comércio este que caracteriza uma das principais ameaças às populações de tubarões (STEVENS; BRADFORD; WEST, 2010). A espécie é amplamente distribuída em águas tropicais e temperadas, desde a superfície até 1.000m de profundidade e não há estimativas disponíveis acerca do tamanho absoluto da população global do tubarão-azul. Apesar de resultados genéticos sugerirem uma única população global, com pouca ou nenhuma diferenciação dentro e entre as bacias oceânicas, é comum a análise da viabilidade da espécie em termos de cinco estoques pesqueiros: Atlântico Sul; Atlântico Norte; Pacífico Sul; Pacífico Norte; e Oceano Índico (RIGBY, 2019).

Atualmente o tubarão-azul está classificado como espécie quase ameaçada (NT) na lista vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza (RIGBY, 2019) por conta de projeções negativas das tendências populacionais, e trabalhos anteriores já mostraram declínios populacionais crescentes, além do aumento de capturas não declaradas e ilegais que acabam interferindo na organização dos dados (LESSA; SANTANA; HAZIN, 2004). A exemplo disso, há dois anos foi apreendido no Brasil um estoque com cerca de 29 toneladas de barbatanas, tubarões-azuis e anequim (*Isurus oxyrinchus*) (EMPRESA [...],

2023). O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) estima que aproximadamente 10 mil animais foram mortos, durante um período de três anos. O caso exemplar ocorreu no litoral de Santa Catarina, e torna explícita a necessidade de novos trabalhos visando a conservação da espécie. (BARRETO, 2015; SILVA; LESSA; SANTANA, 2021).



Figura 1. Barbatanas de tubarão apreendidas em mega operação em Santa Catarina.

Fonte: Ibama/Divulgação, 2023.

Uma ferramenta importante para a avaliação do estado de conservação de espécies, do impacto das ameaças e da relevância das ações de manejo são as assim chamadas Análises de Viabilidade Populacional, ou AVP. As AVP são modelos de dinâmica populacional que unem o conhecimento geral sobre uma espécie (estrutura etária, distribuição e abundância, taxas de natalidade e mortalidade, etc.) com o objetivo de projetar o tamanho populacional, a probabilidade de extinção e sua diversidade genética (LACY, 2019). As AVP podem ajudar a entender como mudanças antrópicas e/ou biológicas afetam a população de uma espécie, permitindo aos conservacionistas testar diferentes estratégias de manejo para diferentes cenários (BEISSINGER; WESTPHAL, 1998).

A Análise Demográfica constitui um tipo especial de AVP, que utiliza informações da história de vida da espécie, tais como taxa de mortalidade e natalidade, maturidade sexual e idade máxima de reprodução, para obtenção de parâmetros como R_0 (Taxa reprodutiva), T (Tempo de geração), r (Taxa de crescimento populacional intrínseca) e λ (Taxa finita de

crescimento populacional) (MOLLET; CAILLIET, 2002; CHEN; YUAN, 2006). Esses parâmetros são gerados e analisados através de tabelas de vida e matrizes de *Leslie*, já consolidadas na área de análises demográficas (MOLLET; CAILLIET, 2002). Previamente foram feitos trabalhos de Análise Demográfica para avaliar a situação do *P. glauca*, mais especificamente na população do Atlântico Sul, a mais afetada pela pesca legal e ilegal, e constatou-se uma taxa de crescimento populacional intrínseca de -0,043, indicando uma diminuição populacional, com análise de elasticidade ressaltando a relevância de indivíduos jovens para a sustentabilidade da população (SILVA, 2019).

Uma outra perspectiva para realização de Análises de Viabilidade Populacional é por meio de simulações de Monte Carlo de modelos de população nos quais são introduzidos parâmetros demográficos, genéticos, comportamentais e ambientais, todos baseados em informações da história de vida da espécie estudada (LINDENMAYER et al., 1995). O Vortex (LACY; POLLAK, 2023) é um *software* que simula as dinâmicas complexas do crescimento de uma população de determinada espécie e como essas dinâmicas podem alterar com o tempo na presença de ameaças humanas e/ou naturais. É amplamente utilizado na criação de análises de viabilidade populacional, através de simulações estocásticas realizadas em diferentes contextos e cenários (TRAYLOR-HOLZER, 2021; BARCELLOS; ESCARLATE-TAVARES, 2019).

Considerando a relevância do tema, neste Trabalho de Conclusão de Curso foi estudada a viabilidade populacional do tubarão-azul no Atlântico Sul para um cenário natural, considerando uma situação de ausência de pesca. O trabalho foi baseado na análise atual do estado de conservação da espécie e projeções futuras, na disponibilidade de dados na literatura e na comparação com trabalhos prévios de avaliação de viabilidade da população da espécie. A perspectiva é que, ao comparar os métodos usados anteriormente com os aqui propostos (Vortex) possamos avaliar também a eficácia desse *software* para o grupo dos elasmobrânquios.

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise da viabilidade populacional da população do Atlântico Sul de *Prionace glauca*, sob cenário natural, através do *software* Vortex. Os objetivos específicos são:

- 1) Coletar informações na literatura sobre a vida de *Prionace glauca* no Atlântico sul;

- 2) Desenvolver um modelo base de *Prionace glauca* no Atlântico sul, para um cenário natural;
- 3) Comparar os resultados obtidos pelo Vortex com os resultados já registrados através da análise demográfica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Espécie focal e área de estudo

O presente estudo tem como foco o estoque de *Prionace glauca* no Atlântico Sul. Para elaboração do modelo populacional desenvolvido neste TCC, foram consideradas prioritariamente estimativas de parâmetros demográficos próprias ao Atlântico Sul e, alternativamente, estimativas provenientes de outras áreas de ocorrência da espécie.

2.2. Taxas vitais e estimativa populacional

Os parâmetros reprodutivos utilizados para a construção do modelo foram: a idade de maturação; o tempo de gestação; a razão sexual; a fecundidade; e o percentual de fêmeas que reproduzem anualmente. Tais parâmetros foram obtidos na literatura, como os obtidos por Silva, Lessa e Santana (2021). A longevidade máxima estimada e as taxas de mortalidade natural também foram incorporadas ao modelo (MONTEALEGRE-QUIJANO; VOOREN, 2009; SILVA; LESSA; SANTANA, 2021).

Acerca do tamanho populacional, não existem estimativas do número de indivíduos para *P. glauca* no Atlântico Sul até o seguinte momento. Entretanto, o relatório bienal do Comitê Permanente de Pesquisa e Estatística (*Standing Committee Research and Statistics - SCRS*) da Comissão Internacional pela Conservação de Atuns do Atlântico (*International Commission for the Conservation Atlantic Tunas - ICCAT*) para os anos de 2024-2025 (BROWN, 2025) apresenta para *P. glauca* no Atlântico Sul um valor de massa para captura máxima sustentável (MSY) de 27.711 toneladas e uma taxa de mortalidade por pesca na situação de captura máxima sustentável (F_{MSY}) entre 10% e 30%, que levariam a uma biomassa máxima sustentável (B_{MSY}) entre 92.370 t e 277.110 t. Considerando a relação entre biomassa atual e B_{MSY} como sendo de 1,29, ainda de acordo com Brown (2025), estima-se uma biomassa entre 119.160 t e 357.470 t. Levando em consideração que no estoque existem indivíduos de todos tamanhos e pesos diferentes, como os juvenis que são mais abundantes e deslocam a média para baixo, foi estimado um tamanho populacional para o estoque

considerando um peso médio entre 45 e 25 kg, resultando, nos casos extremos, em um intervalo de 2 a 14 milhões de indivíduos presentes no estoque aproximadamente.

2.3. Simulações numéricas

Para implementação do modelo da população de tubarões-azuis do Atlântico Sul, foi utilizado o *software* Vortex (versão 10.10.0), uma plataforma que permite a criação de modelos populacionais versáteis, além da realização de simulações estocásticas destes modelos (LACY; POLLAK, 2023). Construímos no *software* um cenário base composto pelas melhores estimativas disponíveis para os parâmetros de entrada. A ordem de eventos anual do Vortex padrão foi seguida sem alterações. No cenário base e em todos os outros cenários construídos foram realizadas 1000 simulações, para projeções de três tempos geracionais (10 anos), totalizando 30 anos.

Com os parâmetros do cenário base já estabelecidos, foram criadas cópias do cenário a fim de se estudar o efeito do tamanho da população inicial sobre os resultados do modelo. As cópias foram geradas mudando apenas a entrada relativa à população inicial, aumentando o valor de forma geométrica por um fator de dez: de 10^3 indivíduos até 10^6 (próximo da estimativa mencionada anteriormente). Para esse caso, a capacidade suporte foi estabelecida como o dobro da população inicial de cada cenário, a fim de melhor compreensão dos resultados.

A opção de executar o modelo com iterações baseadas em populações foi utilizada para rodar os cenários, visto que o estoque analisado possui alto número de indivíduos. E, portanto, não foi incluída a depressão por endogamia, visto novamente o grande tamanho da população e também os padrões migratórios da espécie dentro do mesmo estoque.

A capacidade de suporte, no caso do cenário base, foi definida como vinte vezes o tamanho da população inicial a fim de melhor compreensão dos resultados, devido ao alto crescimento esperado. Ao final foram analisadas as projeções futuras para abundância populacional, probabilidade de extinção e taxa de crescimento populacional, que foram comparadas a resultados obtidos em modelos demográficos prévios (SILVA, 2019).

Em todos os casos as simulações numéricas foram analisadas por meio de gráficos das populações como função do tempo e pelas taxas intrínsecas de crescimento. Tais taxas podem ser calculadas de duas formas: determinística, obtida por meio dos autovalores da matriz de *Leslie* associada (r-determinístico); e estocástica, que considera as flutuações e eventos

aleatórios entre as simulações (r-estocástico). O crescimento (ou decrescimento) também pode ser avaliado pelo valor de λ (taxa finita de crescimento anual), normalmente expresso pela razão do tamanho da população por certo intervalo de tempo, neste caso de ano a ano (RIBEIRO; PAGOTTO, 2011). Os dois estão diretamente relacionados, ambos representam o crescimento porém de maneiras diferentes (MORAES; FARIAS; JESUS, 2024).

$$\lambda = e^r \text{ ou } r = \ln \lambda$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ciclo de vida

O ciclo de vida pode ser considerado anual e começa na primavera e início do verão, com a cópula ocorrendo em águas da região Sul e Sudeste do Brasil (HAZIN; LESSA, 2005). Após a cópula, as fêmeas estocam esperma em suas glândulas nidamentárias para posterior fertilização (PRATT, 1979) e a partir disso podem seguir dois caminhos: migrar em direção norte em busca de águas equatoriais, a fim de facilitar processos como ovulação, fertilização e desenvolvimento dos embriões, por meio do aumento do metabolismo devido a maior temperatura da água; ou permanecer na mesma região após a cópula para iniciar os demais processos de desenvolvimento de forma imediata (MAS *et al.*, 2023). Para as fêmeas que realizam a migração para águas do nordeste do Brasil, após a fertilização, quando em gestação migram para leste em direção à costa da África no Atlântico e permanecem durante outono e inverno para desenvolvimento dos embriões. Já em fase final de gestação, as fêmeas migram para latitudes mais altas do Atlântico sul, seja na costa brasileira ou africana, chegando às águas mais frias perto do início da primavera. O parto ocorre pouco tempo depois, nessa mesma faixa latitudinal ao sul do Brasil e da África, em local ainda não identificado (CASTRO; MEJUTO, 1995; MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007; MAS *et al.*, 2023).

Apesar do relatado padrão migratório da espécie, não foi atribuída dispersão para o modelo base, visto que os deslocamentos conhecidos ocorrem dentro do mesmo estoque, e dispersões para com outros estoques (Atlântico norte, Pacífico) não foram ainda descritas pela literatura.

3.2. Parâmetros do Cenário Base

O sistema de acasalamento é poligâmico do tipo poligenia de pareamento curto, ou seja, as fêmeas podem copular com vários machos diferentes a cada ciclo reprodutivo (PRATT, 1979). Os dados reprodutivos encontrados envolvem a maturação sexual, a quantidade de embriões e a razão sexual destes, assim como a taxa de fêmeas reproduzindo a cada ano. Vale ressaltar que os valores utilizados referem-se a dados obtidos no Atlântico sul, sendo sua maioria para o Atlântico sudoeste especificamente. A idade de primeira maturação utilizada foi de seis anos para ambos os sexos e a máxima idade reprodutiva adotada foi de 15 anos também para ambos os sexos (MONTEALEGRE-QUIJANO; VOOREN, 2009; JOUNG et al., 2017; SILVA; LESSA; SANTANA, 2021). A fecundidade uterina máxima adotada foi de 55 indivíduos (MAS et al., 2023). A razão sexual é de 1:1 e o tempo de gestação de 9 a 12 meses (HAZIN; LESSA, 2005; MONTEALEGRE-QUIJANO et al., 2014; SILVA; LESSA; SANTANA, 2021). Os dados acerca do sistema reprodutivo encontram-se condensados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de entrada sobre o sistema reprodutivo do tubarão-azul, no modelo.

Sistema reprodutivo			
Parâmetro	Informação	Referência	Confiabilidade
Sistema de acasalamento	Poligâmico	PRATT, 1979	Alta
Sistema: Pareamento longo ou curto?	Pareamento curto	PRATT, 1979	Alta
Idade típica de início de reprodução - Fêmeas	6	SILVA et al., 2021	Alta
Idade típica de início de reprodução - Machos	6	SILVA et al., 2021	Alta
Máxima idade reprodutiva - Fêmeas	15	JOUNG et al., 2017	Alta
Máxima idade reprodutiva - Machos	15	JOUNG et al., 2017	Alta
Idade máxima atingida	16	SILVA et al., 2021	Alta
Número máximo de gestações por ano	1	HAZIN; LESSA, 2005	Alta

Número máximo de filhotes por gestação	55	MAS et al., 2023	Alta
Razão sexual de filhotes	50%	MAS et al., 2023	Alta
Filhotes dependentes da mãe	Não	PRATT, 1979	Alta

Para a proporção de fêmeas adultas reproduzindo anualmente, foi identificada uma incerteza no parâmetro após o levantamento bibliográfico. Foram analisados trabalhos com amostras de campo (BORNATOWSKI; SCHWINGEL, 2008; CASTRO; MEJUTO, 1995; HAZIN et al., 1994; HAZIN; PINHEIRO; BROADHURST, 2000; MEJUTO; GARCÍA-CORTÉS, 2005; MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007) porém a flutuação do valor foi considerada um fator preocupante. Isto porque dentre esses trabalhos, alguns apresentavam apenas uma proporção de fêmeas grávidas quanto ao total de indivíduos capturados (incluindo machos e de sexo não identificado), outros apresentavam um percentual em relação às fêmeas observadas, contudo não em relação as fêmeas adultas. Existiu ainda a preocupação com os dados sobre marcas de cópula, que são as mordidas que o macho efetua na fêmea durante o acasalamento. Após conversas com especialistas no grupo, foi constatado que essas marcas nem sempre indicam um animal maduro sexualmente, isto porque muitas vezes os machos podem acabar copulando com uma fêmea imatura, a qual terá as marcas de cópula porém ainda se encontra incapaz de reproduzir devido a sua maturação. Logo, por estas razões não foram levados em consideração dados referentes a marcas de cópulas nas fêmeas para descobrir o percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente. O valor considerado foi baseado no trabalho de Montealegre-Quijano e Vooren (2009), o qual apresenta uma proporção de fêmeas grávidas por idade de acordo com uma função logística, ajustada por meio de dados de campo. Foi utilizada a fórmula LOOKUP presente no manual do Vortex (LACY; MILLER; TRAYLOR-HOLZER, 2021) para a entrada dessa informação.

Tabela 2. Valores de entrada para a porcentagem de fêmeas adultas de tubarão-azul reproduzindo anualmente, de acordo com função logística no modelo Montealegre-Quijano e Vooren (2009).

Percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente	
Idade	Proporção de fêmeas grávidas
6	0,163
7	0,319
8	0,497
9	0,652
10	0,763
11	0,837
12	0,884
13	0,914
14	0,934
15	0,948
16	0,957

Foi constatado por Montealegre-Quijano e Vooren (2009) que a produtividade das fêmeas aumenta conforme a idade, com a tendência de maior prole em indivíduos mais maduros. O percentual de gestações por ano usado foi de 100% para uma gestação (HAZIN; LESSA, 2005). Para a distribuição do tamanho da prole por fêmea grávida foi utilizado o valor médio de 35 filhotes com desvio padrão de 7%, visto que o intervalo mínimo e máximo de filhotes vai de 4 a 55 animais respectivamente (MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007; MAS et al, 2023).

Tabela 3. Valores de entrada para as taxas reprodutivas do tubarão-azul, no modelo.

Taxas reprodutivas			
Parâmetro	Informação	Referência	Confiabilidade
A produtividade das fêmeas muda com a idade?	Sim	MONTEALEGRE-QUIJANO; VOOREN, 2009	Alta

Percentual de gestações por ano

1	100%	HAZIN; LESSA, 2005	Alta
---	------	--------------------	------

Número de filhotes possíveis

Média	35	MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007; MAS et al, 2023	Alta
-------	----	--	------

Desvio padrão	7%
---------------	----

No âmbito das mortalidades, os valores foram extraídos da taxa de mortalidade natural idade-específica obtida por Montealegre-Quijano e Vooren (2009) para ambos os sexos. O valor da mortalidade para cada faixa etária foi convertido para uma porcentagem de sobrevivência anual usando a fórmula: $S = e^{-M}$, e posteriormente convertida para taxa de mortalidade natural anual através da fórmula: $m = 1 - S$. Montealegre-Quijano e Vooren (2009) apresentam mortalidades até os 12 anos de idade, e no presente trabalho o valor de mortalidade correspondente a essa idade foi extrapolado para as faixas etárias subsequentes. Houve também um ajuste para a mortalidade no primeiro ano de vida, a qual estaria superestimando a sobrevivência segundo o próprio autor. Para esse ponto foi utilizado o valor médio de 50% de sobrevivência dos neonatos baseado neste próprio artigo, visto que os valores discutidos para um cenário real estariam entre 40 e 60%.

Tabela 4. Valores de taxa de mortalidade considerados para o modelo, utilizando dados de taxa de mortalidade idade-específica calculada por Montealegre-Quijano e Vooren (2009).

Taxas de mortalidade		
Idade	Sobrevivência (%)	Mortalidade (%)
0 - 1	50	50
1 - 2	72,40	27,60
2 - 3	76,03	23,97
3 - 4	78,27	21,73
4 - 5	79,85	20,15
5 - 6	80,98	19,02

6 - 7	81,79	18,21
7 - 8	82,45	17,55
8 - 9	82,94	17,06
9 - 10	83,36	16,64
10 - 11	83,61	16,39
11 - 12	83,86	16,14
12 - 13	84,11	15,89
13 - 14	84,11	15,89
14 - 15	84,11	15,89
15 - 16	84,11	15,89

3.3. Simulações do Cenário Base: efeito da população inicial

Após a coleta das informações sobre o ciclo de vida, reprodução e mortalidade, estas foram inseridas no Vortex para criação do modelo base, representado pelo Cenário Base. Este cenário representa uma projeção natural da espécie, desconsiderando qualquer ameaça extra (pesca) para a população observada.

O comportamento do modelo foi analisado para distintos tamanhos da população inicial. Os resultados podem ser observados no gráfico de tamanho populacional em escala logarítmica em razão do tempo (Figura 2) e na tabela contendo o valor de r estocástico para cada um dos cenários (Tabela 5). As dinâmicas populacionais obtidas demonstram um crescimento semelhante, nos quais os valores obtidos são proporcionais ao tamanho inicial da população.

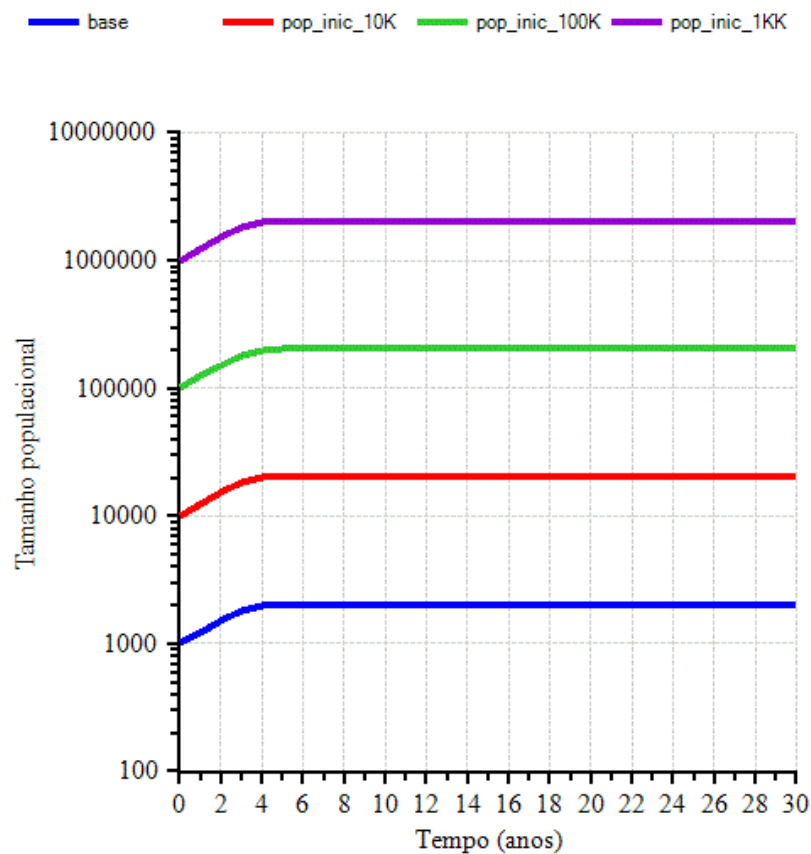


Figura 2. Projeção do cenário base com quatro valores distintos para a população inicial: 1 mil (azul), 10 mil (vermelho), 100 mil (verde) e 1 milhão (roxo), curva do número de indivíduos ao longo de 30 anos, utilizando os dados do ciclo de vida natural.

Tabela 5. Valores de taxa de crescimento exponencial estocástico (stoch-r) para cada cenário, aumentando o tamanho da população inicial.

Cenário	stoch-r
Base	0,1959
pop_ini_10k	0,1960
pop_ini_100k	0,1957
pop_ini_1KK	0,1955

3.4. Simulações do Cenário Base: desempenho do modelo

Em função da semelhança qualitativa dos cenários com diversas populações iniciais, o cenário base e suas possíveis modificações, os cenários subsequentes foram construídos considerando uma população de 1.000 indivíduos.

Os resultados das simulações do cenário base podem ser observados no gráfico com número de indivíduos na população em razão do tempo em anos (Figura 3). Os valores de r obtidos foram 0,1953 (determinístico) e 0,1959 (estocástico), sendo que o último corresponde a $\lambda = 21,64\%$. O tempo geracional médio obtido foi de 9,1 anos.

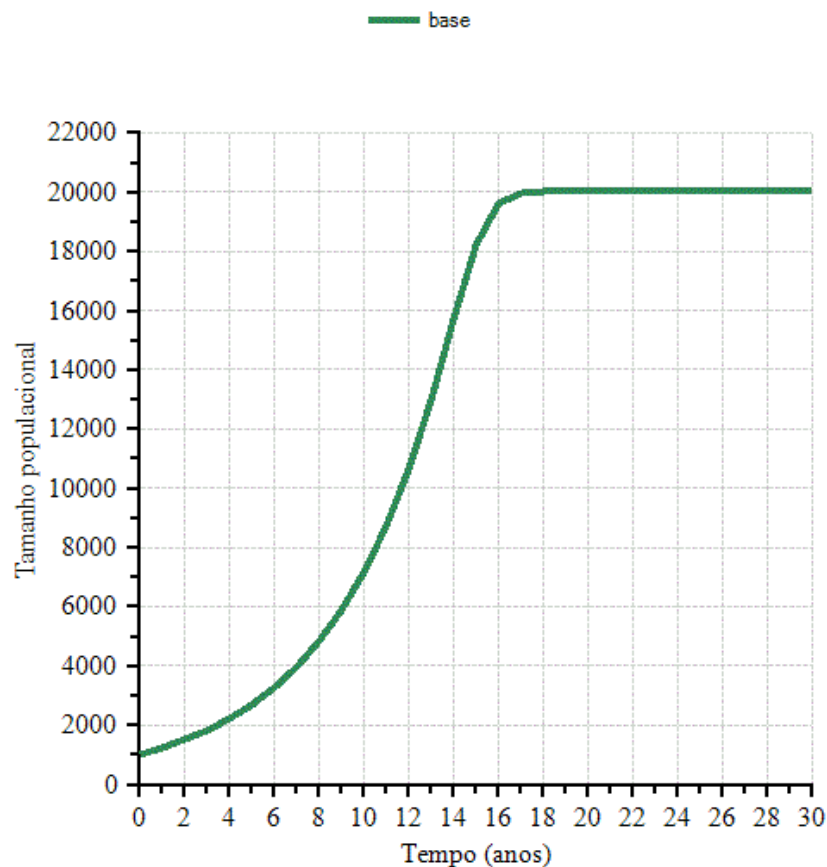


Figura 3. Projeção do cenário base, curva do número de indivíduos ao longo de 30 anos, utilizando os dados do ciclo de vida natural.

Sob a proposta de comparação com demais formas de análise demográfica para a espécie em um contexto utópico da ausência de pesca, os resultados obtidos podem ser considerados

semelhantes ao método de tabelas de vida usado por Montealegre-Quijano e Vooren (2009). Essa informação é positiva em vista de que parâmetros importantes como a taxa de mortalidade e o percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente foram retirados desta análise demográfica. O modelo base aqui proposto apresentou crescimento anual de 21,56%, muito próximo do crescimento anual de 24,2% obtido por Montealegre-Quijano e Vooren (2009). Além de λ , os demais parâmetros da tabela de vida gerada por Montealegre-Quijano e Vooren também estão próximos dos obtidos pelo seguinte trabalho (Tabela 6), os quais indicam uma população saudável, sem riscos de extinção dentro do intervalo de três tempos geracionais (30 anos), e crescimento anual positivo superior aos 20%.

Tais resultados corroboram com a expectativa de validar a análise de viabilidade populacional utilizando o Vortex para o grupo dos elasmobrânquios, especificamente na família Carcharhinidae. Atualmente, a vasta maioria dos trabalhos de análise demográfica para o grupo são realizados por meio da elaboração de tabelas de vida que podem ser convertidas em matrizes de *Leslie* (no caso de populações estruturadas por classes etárias) ou em matrizes de *Lefkovich* (em populações estruturadas por estágios). Por meio da análise das matrizes, pode-se obter respostas importantes como a taxa finita de crescimento populacional (λ), a taxa de crescimento populacional intrínseca (r) e o tempo de geração (T), além das elasticidades, as quais servem para medir o efeito relativo de pequenas mudanças proporcionais em elementos individuais da matriz, assumindo que outras taxas permaneçam constantes, e dessa forma avaliar pontos sensíveis da população a fim de entender sua dinâmica (CORTÉS, 2002). Além disso, substituindo os valores fixos dos elementos das matrizes analisadas por valores estocásticos seguindo distribuições probabilísticas pré-determinadas é possível obter distribuições dos valores resposta (λ , r e T).

Alternativamente, as análises de viabilidade populacional realizadas por meio de simulações baseadas em agentes, como o Vortex, também se baseiam em conceitos obtidos por análises demográficas prévias, todavia utilizam dados adicionais como informações biológicas (sistema reprodutivo, taxas reprodutivas, taxas de mortalidade, abundância), dados genéticos (efeitos da endogamia) e informações ambientais (capacidade de suporte e risco de catástrofes) para entender a dinâmica populacional de forma mais complexa. Ademais, as AVPs permitem abordagens para estratégias de manejo específicas da espécie estudada, dependendo do contexto da população em questão, o que facilita e objetiva grandemente a conservação. A título de comparação, considerando resultados das análises estocásticas realizadas por matriz de *Leslie* pelo Projeto de Apoio Técnico-Científico ao Desenvolvimento da Pesca de Atuns e Afins no Brasil (PROTUNA) em 2022 a partir de dados do programa para um cenário utópico sob ausência da

pesca, a população estaria crescendo a uma taxa intrínseca de 31,5% ($r = 0,315$), com uma taxa líquida reprodutiva ($R0$) de 13,405. Em comparação com os parâmetros demográficos obtidos pelo presente trabalho, há um crescimento muito superior, com aumento de 10% no crescimento anual da população e de 100% aproximadamente na taxa líquida reprodutiva. Essa grande diferença, evidenciada nos parâmetros demográficos presentes na tabela 6, entretanto, pode ser explicada justamente pela maneira como as informações de entrada do modelo são utilizadas. Para a matriz, foi usado um valor médio das mortalidades naturais obtidas pelo programa para todas as idades, enquanto que para o Vortex foram usados valores específicos de mortalidade para cada faixa etária, especialmente para com a mortalidade dos neonatos, um dado sensível que interfere em toda dinâmica populacional. Montealegre-Quijano e Vooren (2009) levantam uma discussão sobre a sobrevivência dos neonatos, e a partir da criação de múltiplos cenários chegam a conclusão de que sob a condição de ausência da pesca, *P. glauca* resistiria a uma mortalidade de 90% dos neonatos, mantendo a população em equilíbrio ($r = 0$ e $\lambda = 1$) sob condições naturais. Outro possível diferencial é acerca do percentual de fêmeas reproduzindo anualmente. Nas análises do PROTUNA, não é possível ter certeza do número de fêmeas adultas reproduzindo por ano em relação a população, muito pela própria forma de análise demográfica utilizada. Já na AVP, não só é possível detalhar a porcentagem definida, como também utilizar de fórmulas para indicar o percentual para cada faixa etária da população, forma como foi empregada neste trabalho.

Tabela 6. Resultados dos cenários naturais para *Prionace glauca* (desconsiderando a pesca) deste trabalho (Base); de Montealegre-Quijano e Vooren (2009) e do PROTUNA (2022). r = taxa de crescimento exponencial; λ = taxa de crescimento anual; G = tempo geracional; $R0$ = taxa líquida reprodutiva.

Cenário	r	$R0$	G	λ
Base	0,1959	6,695	9,10	21,56%
Montealegre-Quijano e Vooren (2009)	0,216	6,903	8,93	24,2%
PROTUNA (2022)	0,315	13,405	7,160	37%

3.5. Análise de sensibilidade

Durante a coleta de dados, foi identificada uma incerteza justamente no parâmetro da porcentagem de fêmeas adultas reproduzindo anualmente, como indicado anteriormente. Desse modo, foi feita uma análise de sensibilidade acerca de variações no valor de entrada. Foram criados cenários partindo de 40% até 100% de fêmeas adultas reproduzindo, com

intervalos de 10% cada, totalizando em sete cenários (tabela 7). Ao tomar como foco o cenário base, observa-se por meio do gráfico abaixo (figura 4) e da tabela 7 que este se encontra entre os intervalos de 40% e 50% das fêmeas reproduzindo.

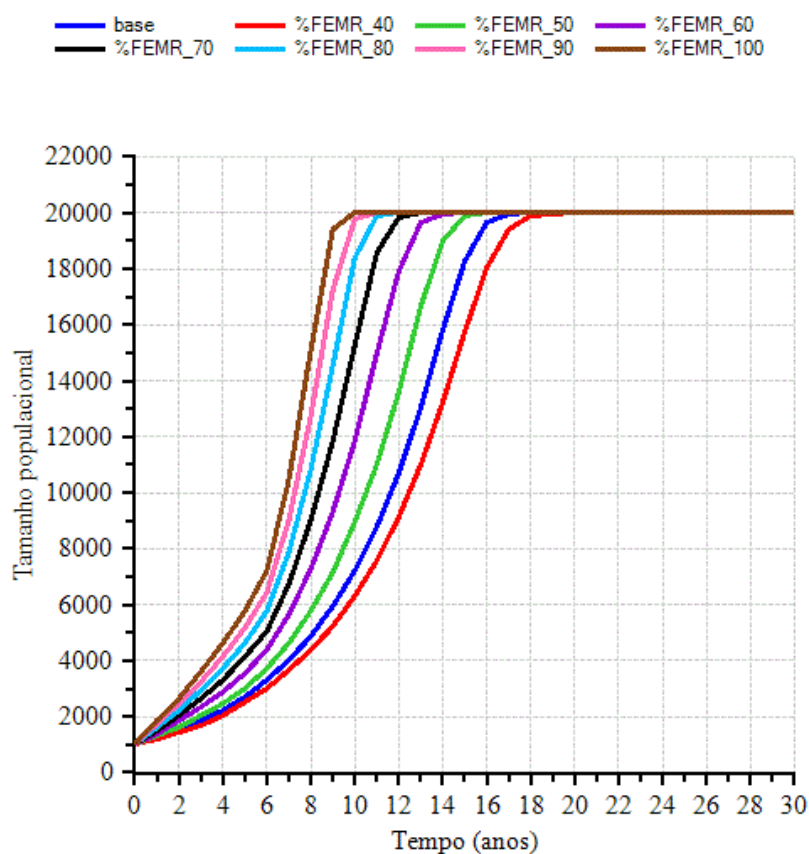


Figura 4. Projeção de projeção do tamanho populacional médio considerando a mudança no percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente, em razão do tempo em anos.

Tabela 7. Valores de taxa de crescimento exponencial determinístico, estocástico e taxa de crescimento anual para cada cenário, ajustando o percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente, a partir do modelo base. det-r = taxa de crescimento exponencial determinístico; stoch-r = taxa de crescimento exponencial estocástico; λ = taxa de crescimento anual.

Cenário	det-r	stoch-r	λ
Base	0,1953	0,1959	21,56%
%FEMR_40	0,1852	0,1843	20,34%
%FEMR_50	0,2134	0,2140	23,78%
%FEMR_60	0,2367	0,2385	26,71%
%FEMR_70	0,2567	0,2607	29,27%
%FEMR_80	0,2742	0,2794	31,55%
%FEMR_90	0,2898	0,2964	33,61%
%FEMR_100	0,3037	0,3124	35,49%

Em comparação com trabalhos anteriores sobre a reprodução de *P. glauca* envolvendo a captura de indivíduos, existe uma grande variação no percentual de fêmeas grávidas encontradas (BORNATOWSKI; SCHWINGEL, 2008; CASTRO; MEJUTO, 1995; HAZIN et al., 1994; HAZIN; PINHEIRO; BROADHURST, 2000; MEJUTO; GARCÍA-CORTÉS, 2005; MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007). Entretanto, apenas alguns trazem um percentual de fêmeas grávidas em relação a população de fêmeas adultas especificamente (BORNATOWSKI; SCHWINGEL, 2008; HAZIN et al., 1994; HAZIN; PINHEIRO; BROADHURST, 2000; MONTEALEGRE-QUIJANO, 2007), dado que melhor representa a entrada no Vortex. Ao analisar apenas esses trabalhos que separam as fêmeas quanto adultas e não adultas, com exceção de Bornatowski & Schwingel (2008), observa-se uma faixa de valores entre 60% e 70% de fêmeas grávidas, valor significativamente superior ao utilizado no modelo base. Analisando os parâmetros demográficos resultantes dos cenários equivalentes a esse intervalo, identifica-se um crescimento anual de 26,71% a 29,27%. Admitindo como esse sendo o intervalo real do estoque, sua situação seria ainda mais confortável do ponto de vista natural.

4. CONCLUSÃO

A coleta de dados sobre o ciclo de vida de *P. glauca* indicou alta confiabilidade para grande maioria dos parâmetros, a não ser pelo percentual de fêmeas adultas reproduzindo anualmente, identificada pela falta de unanimidade em seu valor. É importante um aprofundamento nos estudos acerca desse parâmetro para o futuro, vista sua relevância para a dinâmica do estoque, demonstrada pela análise de sensibilidade realizada. Após uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e análises demográficas prévias, o *software* Vortex se consolida como uma ferramenta alternativa para a conservação de elasmobrânquios, ao replicar projeções anteriores utilizando-se quase que dos mesmos dados. O modelo apresentado servirá ainda para futuras Análises de Viabilidade Populacional do estoque do Atlântico sul de *Prionace glauca*, assim como de outras espécies do grupo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELLOS, L. R.; ESCARLATE-TAVARES, F. Using software Vortex as a tool towards conservation actions for sharks. **bioRxiv** 831677 Disponível em: <http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/831677>. Acesso em: 1 nov. 2023.

BARRETO, R. R. P. **História de vida e vulnerabilidade de tubarões oceânicos (Elasmobranchii) do atlântico sul**. Tese (Doutorado), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil, 2015.

BEISSINGER, S. R.; WESTPHAL, M. I. On the Use of Demographic Models of Population Viability in Endangered Species Management, **The Journal of Wildlife Management**, v. 62, n. 3, p. 821-841, 1998.

CASTRO, Ja; MEJUTO, J. Reproductive parameters of blue shark, *Prionace glauca*, and other sharks in the Gulf of Guinea. **Marine and Freshwater Research**, v. 46, n. 6, p. 967, 1995.

CARVALHO, F. C. et al. Catch rates and size composition of blue sharks (*Prionace glauca*) caught by the Brazilian pelagic longline fleet in the southwestern Atlantic Ocean. **Aquatic Living Resources**, v. 23, n. 4, p. 373–385, out. 2010.

CHEN, P.; YUAN, W. Demographic analysis based on the growth parameter of sharks. **Fisheries Research**, v. 78, n. 2, p. 374–379, 1 maio 2006.

CORTÉS, E. Incorporating Uncertainty into Demographic Modeling: Application to Shark

Populations and Their Conservation. **Conservation Biology**, v. 16, n. 4, p. 1048–1062, ago. 2002.

DENT, F.; CLARKE, S. State of the global market for shark products. **FAO Fish. Aquacult. Tech. Pap.**, v. 590, 1 jan. 2015.

DÍAZ, S. et al. Set ambitious goals for biodiversity and sustainability. **Science**, v. 370, p. 411–413, 2020.

EMPRESA que teve 28,7 toneladas de barbatanas de tubarão apreendidas em SC diz que estoque acumulou em 3 anos. **G1**, 21 jun. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2023/06/21/empresa-que-teve-287-toneladas-de-barbatanas-de-tubarao-apreendidas-em-sc-diz-que-estoque-acumulou-em-3-anos.ghtml>. Acesso em: 6 maio 2024.

FRANKHAM, R. Evaluation of proposed genetic goals and targets for the convention on biological diversity. **Conservation Genetics**, v. 23, p. 865–870, 2022.

GUSTAVO-CARDOSO, L. et al. South Atlantic Blue Shark Stock Assessment 1971-2021 Using Stock Synthesis. **Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT**, v. 80, n. 4, p. 562–588, 2023.

HAZIN, Fábio H. V. *et al.* Reproduction of the Blue Shark *Prionace glauca* in the South-Western Equatorial Atlantic Ocean. **Fisheries science**, v. 60, n. 5, p. 487–491, 1994.

HAZIN, Fábio H. V.; PINHEIRO, Patrícia B.; BROADHURST, Matt K. Further notes on reproduction of the blue shark, *Prionace glauca*, and a postulated migratory pattern in the South Atlantic Ocean. **Ciência e Cultura**, v. 52, p. 114–120, 2000.

HAZIN, Fábio; LESSA, Rosângela. Synopsis of biological information available on blue shark, *Prionace glauca*, from the southwestern Atlantic Ocean. **Collected Volume of Scientific Papers ICCAT**, v. 58, n. 3, p. 1179–1187, 2005.

IUCN. **IUCN red list categories and criteria: version 3.1**. 2. ed. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012.

LACY, R. C. Lessons from 30 years of population viability analysis of wildlife populations. **Zoo Biology**, v. 38, n. 1, p. 67–77, jan. 2019.

LACY, R. C.; POLLAK, J. P. **Vortex: A stochastic simulation of the extinction process**. Version 10.6.0. Chicago Zoological Society, 2023.

LESSA, R.; SANTANA, F. M.; HAZIN, F. H. Age and growth of the blue shark *Prionace glauca* (Linnaeus, 1758) off northeastern Brazil. **Fisheries Research**, v. 66, n. 1, p. 19–30, 1 jan. 2004.

LINDENMAYER, D. B. et al. A review of the generic computer programs ALEX, RAMAS/space and VORTEX for modelling the viability of wildlife metapopulations. **Ecological Modelling**, v. 82, n. 2, p. 161–174, 1 out. 1995.

MAS, F. *et al.* New insights into the reproductive biology of the blue shark (*Prionace glauca*) in the South Atlantic Ocean. **Fisheries Research**, v. 262, p. 106643, jun. 2023.

MEJUTO, Jaime; GARCÍA-CORTÉS, Blanca. Reproductive and distribution parameters of the blue shark *Prionace glauca*, on the basis of on-board observations at sea in the Atlantic, Indian and Pacific Oceans. **Collected Volume of Scientific Papers ICCAT**, v. 58, n. 3, p. 951–973, 2005.

MOLLET, H.; CAILLIET, G. Comparative population demography of elasmobranchs using life history tables, Leslie matrices and stage-based matrix models. **Marine and Freshwater Research**, v. 53, 1 jan. 2002.

MONTEALEGRE-QUIJANO, S.; VOOREN, C. Mortality estimates and life tables of the blue shark, *Prionace glauca* (Carcharhinidae), off southern Brazil and adjacent international waters. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**. v. 4, p. 476-489, 2009.

MONTEALEGRE-QUIJANO, S *et al.* Sexual development, size at maturity, size at maternity and fecundity of the blue shark *Prionace glauca* (Linnaeus, 1758) in the Southwest Atlantic. **Fisheries Research**, v. 160, p. 18–32, dez. 2014.

MORAES, A. L. de; FARIAS, C. A.; JESUS, S. C. de. **Cálculo para ciências ambientais**. São Carlos: CEDA-UFSCAR, 2024. 105 p.

PRATT JR., Harold L. Reproduction in the blue shark, *Prionace glauca*. **Fishery Bulletin**, v. 77, n. 2, p. 445-470, 1979.

RIBEIRO, A. de S.; PAGOTTO, M. Crescimento e regulação populacional. IN: **Ecologia de populações**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, CESAD, 2011. p.35 a 49.

RIGBY C. L. et al. *Prionace glauca*. **The IUCN Red List of Threatened Species 2019**: e.T39381A2915850, 2019.
<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-3.RLTS.T39381A2915850.en>. Acesso em 13 jun

2024.

SILVA, T. E. F. **Uso do habitat e demografia do tubarão azul (Prionace glauca, Linnaeus, 1758) no oceano atlântico sul ocidental**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil, 2019.

SILVA, T. E. F. DA; LESSA, R.; SANTANA, F. M. Current knowledge on biology, fishing and conservation of the blue shark (Prionace glauca). **Neotropical Biology and Conservation**, v. 16, n. 1, p. 71–88, 21 jan. 2021.

STEVENS, J. D.; BRADFORD, R. W.; WEST, G. J. Satellite tagging of blue sharks (Prionace glauca) and other pelagic sharks off eastern Australia: depth behaviour, temperature experience and movements. **Marine Biology**, v. 157, n. 3, p. 575–591, 1 mar. 2010.

TAKEUCHI Y; SENBA Y; NAKANO H. Demographic analysis on Atlantic blue and shortfin mako sharks. **International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, Collective Volume of Scientific Papers SCRS/2004/122**, v. 58, n. 3, p. 1157–1165, 2005.

TRAYLOR-HOLZER, K. **Population Viability Analysis (PVA) Report for Population Augmentation of Zebra Sharks (Stegostoma tigrinum) in Raja Ampat, Indonesia**. Apple Valley, MN, USA: IUCN SSC Conservation Planning Specialist Group, 2021.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências
Câmpus do Litoral Paulista



Instituto
de Biociências
Câmpus do Litoral Paulista

PARECER FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Discente: LUCAS JULIO AGNELLO

Título: "Análise de Viabilidade Populacional do estoque de tubarão-azul (*Prionace glauca*) no Atlântico sul"

Orientador: Prof. Dr. Fabio Stucchi Vannucchi

Curso/Habilitação: Bacharelado em Ciências Biológicas/Biologia Marinha

COMISSÃO EXAMINADORA	CONCEITO
Prof. Dr. Fabio Stucchi Vannucchi	APROVADO
Prof. Dr. Francisco Marcante Santana da Silva	APROVADO

PARECER:

O candidato foi aprovado. No entanto recomenda-se uma revisão no texto no sentido de aprofundar a interpretação dos resultados do modelo.

CONCEITO FINAL:

A Comissão Examinadora abaixo assinada conclui que o discente Lucas Julio Agnello obteve o seguinte conceito:



APROVADO



REPROVADO

São Vicente, 08 de dezembro de 2025.

Fabio A. Vannucchi

Prof. Dr. Fabio Stucchi Vannucchi

p./ Fabio A. Vannucchi

Prof. Dr. Francisco Marcante Santana da Silva