UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA BIOLÓGICA

AVALIAÇÃO DO ESTADO DE EXPLORAÇÃO DA ALBACORINHA *Thunnus* atlanticus NO OCEANO ATLÂNTICO SUDOESTE: UMA ABORDAGEM BASEADA EM COMPRIMENTO

LUCAS VINÍCIUS SANTOS SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia biológica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE.

Orientador: Prof. Dr. Luís Gustavo Cardoso

Coorientadora: Profa. Dra. Flávia Lucena Frédou

RIO GRANDE

Março de 2023





ATA DE REUNIÃO, DE 09 DE MARÇO DE 2023

ATA 02/2023 - DEFESA DE DISSERTAÇÃO - Eng. de Pesca Lucas Vinícius Santos Silva

Às quatorze horas do dia nove de março do ano de dois mil e vinte e três, na Sala virtual Link: https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/luis-gustavo-cardoso-2, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação do Eng. de Pesca Lucas Vinícius Santos Silva, composta pelos seguintes membros Prof. Dr. Luís Gustavo Cardoso - Orientador, Instituto de Oceanografia - FURG; Profa. Dra. Flavia Lucena Fredou - coorientadora - Departamento de Pesca e Aquicultura- Universidade Federal Rural de Pernambuco; Prof. Dr. Luiz Felipe Cestari Dumont, Instituto de Oceanografia - FURG; Prof. Dr. Paulo Eurico Pires Ferreira Travassos, Departamento de Pesca e Aquicultura - Universidade Federal Rural de Pernambuco; Profa. Dra. Natália Priscila Alves Bezerra, Centro de Ciências Humanas e Naturais - CCHN. Universidade Federal do Espírito Santo. Título da Dissertação: "Avaliação do estado de exploração da albacorinha Thunnus Atlanticus no Oceano Atlântico sudoeste: uma abordagem baseada em comprimento". Dando início à reunião, o Coordenador em exercício do Programa de Pós- GraduaçãoemOceanografiaBiológica-Prof.Dr.LuísGustavoCardoso -agradeceuapresença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após, explicou que o candidato teria um tempo de 45 a 60 min. para explanação do tema, e cada membro da Comissão, um máximo de 30 min. para perguntas. Dando prosseguimento, passou a palavra ao candidato que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após explanação, a Comissão aprovou o que segue: As sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo orientador/candidato para incorporação na versão final. Foi atribuída a seguinte classificação ao candidato: Prof. Dr. Luiz Felipe Cestari Dumont - Classificação: Aprovado; Prof. Dr. Paulo Eurico Pires Ferreira Travassos Classificação: Aprovado; Profa. Dra. Natália Priscila Alves Bezerra - Classificação: Aprovado. O candidato foi considerado APROVADO por UNANIMIDADE. Nada mais havendo a tratar, lavro a presente ata que após lida e Aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pelo aluno e pelo Coordenador do PPGOB.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Felipe Cestari Dumont**, **Servidor**, em 13/03/2023, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Luis Gustavo Cardoso, Servidor**, em 14/03/2023, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por **Natalia Bezerra registrado(a) civilmente como Natalia Priscila Alves Bezerra**, **Usuário Externo**, em 14/03/2023, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº</u> <u>8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Vinícius Santos Silva**, **Usuário Externo**, em 20/03/2023, às 08:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



Documento assinado eletronicamente por **Erik Muxagata**, **Coordenador de Curso**, em 01/04/2023, às 01:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.

Documento assinado eletronicamente por **Paulo TRAVASSOS, Usuário Externo**, em 19/04/2023, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



eletrônica

A autenticidade do documento pode ser conferida no site <u>https://sei.furg.br/sei/controlador_externo.php?</u> <u>acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&lang=pt_BR&id_orgao_a</u> <u>cesso_externo=0</u> informando o código verificador **0025520** e o código CRC **8BF7B386**.

Referência: Caso responda este documento Ata de Reunião, indicar o Processo nº 23116.004936/2023-11 SEI nº 0025520

Ficha Catalográfica

S586a	Silva, Lucas Vinícius Santos.						
	Avaliação do estado de exploração da albacorinha <i>Thunnus</i> <i>atlanticus</i> no Oceano Atlântico Sudoeste: uma abordagem baseada em comprimento / Lucas Vinícius Santos Silva. – 2023. 74 f.						
	Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica, Rio Grande/RS, 2023. Orientador: Dr. Luís Gustavo Cardoso.						
	Coorientadora: Dra. Flávia Lucena Frédou.						
	1. Limtado em dados 2. ICCAT 3. Pequenos tunídeos 4. SPR						
	5. Incerteza I. Cardoso, Luís Gustavo II. Frédou, Flávia Lucena						
	III. Título.						
	CDU 551.46						

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

Agradecimentos

Ao Universo por ter criado todas as oportunidades para que eu pudesse evoluir e aprender a ser um ser humano melhor e mais consciente dos meus próprios atos e do impacto que eu causo ao meu redor.

À minha família que mesmo de longe nunca deixou faltar apoio e conforto, especialmente aos meus pais, minha vó cici, minhas irmãs, minha tia Jack e meu primo Felipe. Vocês foram essenciais para minha sobrevivência nessa fase tão difícil da minha vida.

À melhor turma de mestrado que a PPGOB pôde conhecer. Entramos CAPES 7 e seremos sempre CAPES 7. À Douglas, Marina e Mônica por serem os melhores anfitriões e irmãos que pude ter nesses 2 anos de mestrado. Vocês foram porto seguro em meio a tantas mudanças e conforto nas horas em que mais precisei.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Luís Gustavo Cardoso e Profa. Dra. Flávia Lucena-Frédou por terem me dado a oportunidade de trabalhar com a avaliação de estoques.

Ao Laboratório de Recursos Pesqueiros Demersais e Cefalópodes, especialmente a Giulia e Eidi. Obrigado por terem se envolvido tanto com o meu trabalho e terem ajudado em partes tão essenciais para a conclusão desse trabalho.

Aos pescadores artesanais de Baía Formosa – RN e industriais de Rio Grande – RS. Sem a ajuda de vocês esse trabalho não teria como acontecer.

À FURG pela estrutura e CAPES pelo apoio financeiro.

It's not that it's impossible,

they're just not capable of doing it.

Índice

Resumo	
Abstract	9
1. Introdução	
2. Material e Métodos	
3. Resultados	
4. Discussão	
5. Conclusões	
Referências	
Material suplementar 1	
Material suplementar 2	
Material suplementar 3	
Material suplementar 4	
Lista de Tabelas	
Lista de Figuras	
Apêndice I: Artigo submetido à revista Regional Studies in Marine Science	

Resumo

A maioria dos pequenos tunídeos permanece inacessada devido à falta de dados de esforço e captura, o que dificulta o emprego de vários modelos de avaliação de estoque. A albacorinha Thunnus atlanticus é uma espécie de pequeno tunídeo distribuído no Oeste do Oceano Atlântico que também carece de dados e nunca foi avaliada em relação ao estado dos seus estoques. Algumas evidências demonstram que dois estoques em expansão ocorrem ao longo de sua distribuição: um no Atlântico Noroeste e outro no Atlântico Sudoeste. O objetivo do presente estudo foi estimar o estado do estoque sudoeste usando modelos baseados em comprimentos. Foram reunidos quatro anos de dados de comprimento (1998, 1999, 2013 e 2019) de uma variedade de fontes totalizando 1.929 indivíduos. Dois modelos baseados em comprimento foram aplicados, Length-Based Spawning Potential Ratio (LBSPR) e Stock Synthesis Data-limited tool (SS – DL) e cinco cenários com um conjunto de parâmetros de crescimento (comprimento assintótico, L_{∞} , e coeficiente de crescimento, K) foram construídos para acomodar diferentes histórias de vida disponíveis na literatura. A mortalidade natual (M) foi estimada através de quatro métodos empíricos e três timeblocks foram utilizados para acomodar a seletividade de diferentes artes de pesca ao longo do tempo no modelo SS – DL, e, em geral, os comprimento de seletividade foram maiores que o comprimento de maturidade. Apesar disso, altas mortalidades por pesca relativa (F/M >1) foram encontradas na maioria dos cenários, dado que a pesca apenas seleciona peixes maduros, e altos valores de F/M podem estar presentes mesmo que o estoque mostre valores altos de SPR. O LBSPR estimou valores mais altos de SPR do que o SS – DL, apesar disso, esse modelo apresenta um declínio mais acentuado do que o SS – DL entre o final dos anos 1990 e 2019. Isso pode ter ocorrido devido às diferenças nos parâmetros de seletividade estimados por cada modelo. Além disso, parâmetros de crescimento influenciam na estimação do estoque virginal, e valores altos e intermediários de M/K parecem representar melhor a composição de comprimento estimada, dado a baixa captura histórica da espécie. No geral, o estoque Sudoeste da albacorinha pode ser classificado com uma exploração adequada com um SPR decrescente ao longo do tempo (12% LBSPR e 7% SS – DL). Contudo, devido à incerteza dos resultados, maiores coletas de dados de captura, esforço e comprimento devem ser consideradas. Adicionalmente, SS - DL parece estimar melhor os valores de SPR quando há variabilidade nos parâmetros de crescimento de uma espécie.

Palavras-chave: limtado em dados, ICCAT, pequenos tunídeos, SPR, incerteza.

Abstract

The majority of small scombrids remain unassessed due to the lack of catch and effort data, which hampers the use of several stock assessment models. The blackfin tuna Thunnus atlanticus is a small tuna species distributed in the West Atlantic Ocean falling in the same data lacking and has never been assessed regarding its stock status. Some evidences shows that two stocks in expansion occur along its distribution; one in the Northwest Atlantic and another in the Southwest Atlantic. The aim of the present study was to estimate the status of the Southwestern stock using lengthbased models. A total of four years of length data was gathered (1998, 1999, 2013 and 2019) from a variety of sources with a total of 1,929 individuals. Two length-based models were applied, Length-Based Spawning Potential Ratio (LBSPR) and Stock Synthesis Data-limited tool (SS -DL) and five scenarios combining a set of growth parameters (asymptotic length, L_{∞} , and growth constant, K) were built to accommodate different life histories available in the literature. The natural mortality (M) was estimated through four empirical methods and three time-blocks were used to accommodate the selectivity of different fishing gears through time and, in general, the length at selectivity were larger than the length at first maturity. However, high relative fishing mortality (F/M > 1) were found at most scenarios, given that the fishery only selects mature fish, and high F/M values may be present even if the stock shows high SPR values. The LBSPR estimated higher values of SPR than the SS - DL, however, it presented a steeper decline than SS - DL, between the late 90's and 2019. This may have happened due to differences of selectivity parameters estimated by each model. In addition, growth parameters influence the estimation of the virginal stock, and intermediate and high M/K values seem to represent better the estimated length composition, given the low historical catch of the species. Overall, the blackfin tuna Southwestern Atlantic stock might be classified with a proper exploitation with a decreasing SPR trend over time (12% LBSPR and 7% SS – DL). Even with the limited data, we could have a proxy of stock status estimation by using length-based models which highlights the importance of such data. However, due to the high uncertainty of the results, better collection of catch, effort and length data should be considered. Additionally, SS – DL seems to estimate better SPR values when variability of growth parameters are placed for a given species.

Key-words: data-limited, ICCAT, small tuna, SPR, uncertainty.

1. Introdução

1.1 Contextualização

A constante exploração de recursos naturais e o crescimento populacional têm intensificado a pressão sobre o meio ambiente e populações naturais, muitas das quais apresentam declínios severos (Chrysafi e Kuparinen, 2016). Portanto, o equilíbrio da interação humana com os sistemas que sustentam direta e/ou indiretamente a sociedade, assim como a exploração sustentável e a proteção de espécies e habitats é um grande desafio, considerando a dificuldade em identificar populações ameaçadas, quantificar suas abundância e biomassa e detectar padrões de redução populacional (Lotka, 1907). Países em desenvolvimento são os que mais sofrem pela carência de estudos e informações importantes para a avaliação do estado de exploração visando o estabelecimento de medidas de manejo, cuja efetividade já foi confirmada em países desenvolvidos na recuperação e exploração sustentável de estoques pesqueiros (Hilborn et al. 2020). Além disso, fatores característicos de países em desenvolvimento como a pesca de pequena escala e a descontinuidade na coleta de dados, dificultam a avaliação do estado de exploração de estoques pela deficiência de informações (Reis, 1992; Hordyk et al., 2015). Essa problemática é maior quando atrelada a espécies altamente migratórias como os atuns, que estão distribuídos desde habitats tropicais até sub-polares e são explorados em todos os oceanos do planeta (Heithaus et al., 2008; Reglero et al., 2014).

O Brasil tem participado com 125.000 t nos últimos 10 anos das capturas de atuns e espécies afins no oceano Atlântico (ICCAT, 2015; ICCAT, 2019) e é membro-fundador da Comissão Internacional para a Conservação do Atum Atlântico (ICCAT), tendo a obrigação de reportar anualmente os dados disponíveis acerca do esforço de pesca, da captura e tamanho dos peixes, por espécie e método de pesca usado pela frota atuneira que esteja atuando sob a sua jurisdição (ICCAT, 2015). A ICCAT é a organização regional de ordenamento pesqueiro responsável por ordenar as pescarias através de uma gestão eficiente voltada para a conservação das espécies, através de regras de controle de captura como a captura total permitida (TAC, *total allowable catch*) (Punt, 2006; Smith et al., 2008). A formulação das regras de captura possuem três elementos essenciais comumente conhecidos por biólogos pesqueiros, como a) programa de monitoramento e coleta de dados, b) uma rotina de avaliação, e c) uma ou mais regras de decisão (Smith et al., 2008; 2014). Apesar disso, o Brasil tem enfrentado descontinuidades na coleta de

dados de produção desde 2011, contando apenas com iniciativas de instituições específicas, o que gera lacunas na série histórica de capturas de espécies com importância comercial, dificultando a avaliação de seus estoques. Essa característica de interrupção da coleta de dados abrange a maior parte dos países em desenvolvimento demandando novas abordagens para avaliar o estado de exploração dos estoques pesqueiros (Reis, 1992; Dowling et al., 2019).

1.2 Pequenos tunídeos

O grupo dos pequenos tunídeos é composto por 12 espécies no total: *Thunnus atlanticus*, *Auxis rochei, Sarda sarda, Orcynopsis unicolor, Scomberomorus brasiliensis, Scomberomorus regalis, Auxis thazard, Scomberomorus cavalla, Euthynnus alletteratus, Scomberomorus tritor, Scomberomorus maculatus* e *Acanthocybium solandri*. Apesar de apresentarem 17% do total capturado de atuns e afins reportado anualmente pela ICCAT, têm poucas avaliações de estoque estoque e gestão das pescarias limitada, necessitando de estudos relacionados à estrutura dos seus estoques, sendo considerados em sua maioria pobres em dados (Lucena-Frédou et al., 2021; Pons et al., 2019a,b; Kindong et al., 2020). Apesar de todas as espécies de pequenos tunídeos serem consideradas "pouco preocupantes" pela IUCN (International Union for Conservation of Nature), com exceção do *Orcynopsi unicolor* no mediterrâneo e *Auxis thazard* no Golfo do Méxido, que foram classificadas como vulnerável e com dados insuficientes, respectivamente, apresentam declínio iminente de biomassa e sobrepesca, assim como atuns maiores e mais valiosos (Myers e Worm, 2003; Lucena-Frédou et al., 2021; Zapadaeva, 2021).

Adicionalmente, a maior parte dos pequenos tunídeos permanece globalmente não avaliada e não manejada, os quais têm recebido pouca atenção na avaliação de estoques, principalmente pela falta de dados (Juan-Jordá e tal., 2015). O alto risco e a sobrepesca de espécies alvo da pesca no Atlântico e a influência de mudanças climáticas na suscetibilidade de espécies podem, portanto afetar em futuro próximo populações de pequenos tunídeos considerados como vulneráveis pelo método de análise de produtividade e suceptibilidade (PSA), como é o caso da albacorinha no Atlântico Noroeste e Sudoeste (Lucena-Frédou et al., 2021). Portanto, definir a estrutura dos estoques de pequenos tunídeos tem sido considerada prioridade no oceano Atlântico e Mar Mediterrâneo desde 2017 decidido pelo Grupo de Espécies de Pequenos Tunídeos (*Small Tuna* *Species Group*) no Programa Anual de Pequenos Tunídeos (SMTYP, *Small Tuna Year Program*), baseado na deficiência do conhecimento das diferentes espécies (SCRS, 2019).

1.3 Albacorinha

A albacorinha Thunnus atlanticus é uma espécie de pequeno tunídeo afetada pela descontinuação da estatística pesqueira no Brasil. Essa espécie apresenta uma distribuição mais superficial e menos oceânica do que outras espécies de atum e se distribui no Atlântico ocidental. Recentemente tem se observado a ocorrência da espécie em áreas mais ao sul do Brasil chegando ao Rio Grande do Sul (Mahon e Mahon, 1986; Cardoso et al., 2021). A albacorinha possui grande importância na pesca do Nordeste do Brasil, em Martinica e nas Antilhas para a pesca de pequena escala, sendo crucial na segurança alimentar das populações locais (Doray et al., 2002; Freire et al., 2015; Saillant et al., 2022). No Brasil, o T. atlanticus é pescado de diferentes formas de acordo com a área em que é encontrada (Mahon e Mahon, 1986), sendo capturada em três regiões da costa brasileira (nordeste, sudeste e sul). No Nordeste, a albacorinha possui grande importância na pesca do Rio Grande do Norte, onde é principalmente capturada em Baía Formosa como espécie-alvo pela pesca artesanal, participando como fonte de renda e segurança alimentar para a população local (Freire et al., 2015). Além disso, a espécie também é capturada no Arquipélago de São Pedro e São Paulo através de linha de mão (Bezerra et al., 2013). Na região sudeste, a albacorinha é capturada por diversas artes de pesca como fauna acompanhante de grandes peixes pelágicos. Apesar disso, sua captura é maior no Espírito Santo e Rio de Janeiro sendo capturada por espinhel (Vieira et al, 2005). No Sul, recentemente têm se registrado cada vez mais indivíduos desemabarcados, sendo capturada como fauna acompanhante da pesca de tubarões, atuns e afins de maior porte ou de maior importância comercial (Cardoso et al., 2021). Portanto, a falta de dados e o consequente desconhecimento sobre o atual estado dos estoques da albacorinha dificulta o desenvolvimento de medidas de manejo com o intuito de assegurar a sustentabilidade da exploração da espécie.

1.4 Estrutura populacional da albacorinha

Estudos que abordem a estrutura e conectividade das populações são difíceis de serem executados por necessitarem de um esforço intensivo em grandes extensões de área (Carvalho e Hauser, 1995). O desafio aumenta quando a análise é realizada para espécies altamente migratórias como os atuns, que carecem em geral de barreras ambientais e têm baixa estruturação populacional ao longo de grandes áreas geográficas (Pecorato et al., 2018; Nikolic et al., 2020). A albacorinha tem distribuição desde a costa leste dos Estados Unidos até o Sul do Brasil, onde recentemente sofreu uma expansão na sua distribuição até 34º S, devido à intensificação do fluxo da corrente do Brasil (Cardoso et al., 2021). Estudos com análises moleculares reportaram semelhanças entre o DNA da espécie no Golfo do México, Caribe e adjacências no Atlântico Noroeste e uma possível estruturação populacional dividida em dois estoques: Atlântico Noroeste e Sudoeste devido aos seus padrões reprodutivos divergentes e barreiras oceanográficas como o desague dos Rios Amazonas e Orinoco (Fig.1; Saxton, 2009; Saillant et al., 2022). Isso se deve ao fluxo gênico da albacorinha que é realizado por dispersão larval e sua estruturação populacional é governada pelas correntes oceânicas, o que promove uma conectividade unidirecional que transporta seus ovos e larvas (Saxton, 2009). Adicionalmente, Saxton (2009) sugere que a população do Noreste do Atlântico é uma expansão da população do Golfo do México (Fig. 1). Esse mesmo padrão pode estar ocorrendo com a população do Atlântico Sudoeste, onde as novas ocorrências ao Sul do Brasil são provavelmente uma expansão para latitudes mais elevadas dessa população. Esse comportamento expansionista vem sendo reportado constantemente em outras espécies que habitam o Oceano Atlântico (e.g., *Thunnus thynnus*, *Xiphias gladus*, and *Istiophorus platypterus*; Bremer et al., 2005a; Bremer et al., 2005b; Ely et al., 2005; Bangma, 2006).

1.5 Áreas prioritárias de coleta

Para a melhor compreensão da conectividade de espécies migratórias é importante adotar menores distâncias entre as áreas de amostragem (e.g., Saxton, 2009; Saillant et al., 2022). Conforme a estruturação populacional já registrada para a albacorinha, aéras importantes de coleta para futuras análises moleculares e de desenvolvimento larval no Hemisfério Sul precisam ser definidas, uma vez que o conhecimento sobre as larvas de peixes é essencial para o entendimento de áreas de desova e migração das espécies (Ingram et al., 2017). Essas áreas amplificam o entendimento sobre os estoques da espécie, podendo ser realizada uma avaliação de estoque mais precisa e realista, ressaltando a importânteia desse trabalho para a zona econômica exclusiva do Brasil, o qual abrange a maior parte do estoque do Atlântico Sudoeste da espécie até o conhecimento atual.

Além disso, a venda da espécie pode ocorrer em pontos diferentes de seu desembarque, o que pode enviesar a estimação de abundância da espécie. Isso ocorre em Rio Grande do Norte no Brasil, onde alguns indivíduos são transportados de Areia Branca, onde também existe desembarque da espécie, para serem comercializados em Baía Formosa (comunicação pessoal). Portanto, as seguintes áreas foram definidos como prioritárias: Areia Branca e Baía Formosa – RN por serem importantes locais de captura da espécie no Nordeste do Brasil e serem essenciais na seguranaça alimentar das comunidades locais; Espírito Santo – ES e Rio de Janeiro – RJ por serem locias importantes de desembarque da espécie que é capturada como fauna acompanhante; Rio Grande – RS por ser o local de novas capturas da espécie; e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo – PE por ter sido identificado por Saillant et al. (2022) com características semelhantes do estoque do Atlântico Sudoeste e Noroeste e por ser um importante local de reprodução da espécie (Bezerra et al., 2013) (Fig. 1).



Figura 1. Conhecimento atual dos estoques da albacorinha, seu recente deslocamento para o sul e fatores que determinam sua estruturação populacional (1 – Areia Branca; 2 – Baía Formosa; 3 – Arquipélago São Pedro e São Paulo; 4 – Rio de Janeiro; 5 – Rio Grande; NWA, Noroeste; SWA, Sudoeste; Setas representam as principais correntes oceânicas; Estrelas amarelas, áreas prioritárias de coletas; Estrelas azuis, coleta de genética já realizada (Saillant et al., 2022)).

1.6 Conhecimento atual sobre a exploração da albacorinha

Alguns poucos dados dependentes da pesca estão disponíveis em relação ao estoque no NWA. Lucena-Frédou et al. (2021) reportaram um leve declínio no tamanho médio de 70 a 60 cm na captura de corrico, mas uma tendência estável no comprimento médio anual no geral, e Saillant et al. (2022) reportaram um aumento notável de 70% no desembarque da pesca recreativa nos EUA da década de 80 a 2019. Em relação ao estoque SWA, um único registro de capturas estimadas foi encontrado de 1993 a 2001, no qual remoções de 33,5 (16,8 a 48,6) toneladas por ano em média foram realizadas (Freire et al., 2015). Entretanto, nenhuma avaliação foi realizada para ambos os estoques até hoje, o que atrelado ao declínio de vários estoque SWA da albacorinha. No Brasil, apesar de capturada em uma proporção significante no Rio Grande do Norte, é uma espécie majoritariamente de fauna acompanhante de maiores atuns, peixes de bico, e tubarões (Freire et al., 2015). Portanto, ainda existem muitas incertezas relacionadas ao dados de captura e comprimento da albacorinha, assim como informações limitadas sobre sua história de vida, o que reduz a diversidade de modelos disponíveis para avaliar a condição dos seus estoques, pois a maioria desses modelos requer grande quantidade de informações disponíveis.

1.7 Modelos baseados em comprimento e razão do potencial desovante

Recentemente têm sido desenvolvidos modelos para a avaliação de recursos pesqueiros com dados limitados com o intuito de acessar o entendimento sobre o estado de vários estoques que continuam sendo explorados, apesar da falta de dados contínuos (Wayte e Klaer, 2010; Klaer et al., 2012). Isso ocorre devido à maior disponibilidade de dados de comprimento que são frequentemente um dos conjuntos de dados mais baratos e fáceis de coletar (Quinn e Deriso, 1999). Os modelos baseados em comprimento são os mais adequados, quando nenhum dado de captura, índice de abundância, ou composição de idade está disponível (Hordyk et al., 2015; 2016; Dowling et al., 2019). Para modelos baseados em comprimento, as considerações mais importantes são ter informações de história de vida precisas e dados de composição de comprimento representativos da população explorada (Smith et al., 2008; 2014).

Em pescarias que carecem de dados de captura total ou informação sobre a abundância relativa ou absoluta, avaliações de estoque têm utilizado excessivamente a razão do potencial desovante (SPR, *spawning potential ratio*) como uma alternativa do ponto referecial da biomassa na captura máxima sustentável (Bmsy) (Hordyk et al., 2015; Sun et al., 2017; Babcock et al., 2018; Pons et al., 2019a; Chong et al., 2020). O SPR é definido como a proporção da produção reprodutiva natural (ou não pescada) deixada em uma população sobre uma pressão pesqueira (Walters e Martell, 2004) e um parâmetro biológico comumente utilizado para definir o ponto de referência limite para auxiliar decisões da gestão pesqueira (Walters e Martell, 2004; Brooks et al., 2010). Por definição, estoques não explorados têm um SPR de 100% (SPR100%) e quando a vida útil natural é abreviada pela pesca, o potencial desovante natural do estoque é reduzido à uma razão do nível natural não pescado (SPRx% ou <1,0). Para efeitos de gestão, o SPR de 30% - 40% é internacionalmente reconhecido como um nível alvo a ser atingido, enquanto que SPR de 20% é aceito como nível limite de reposição ao qual o estoque não é comprometido e portanto é usado com ponto de referência (Mace e Sissenwine, 1993).

1.8 Length-Based Spawning Potential Ratio

Existem vários métodos que usam informações de história de vida e composição de comprimento da captura para estimar a intensidade da pesca e valores de SPR que podem ser utilizados como proxy do estado do estoque (Pons et al., 2019a). Um desses métodos é o *Lengthbased Spawning Potential Ratio* (LBSPR) que utiliza relações de história de vida em um modelo populacional baseado no equilíbrio com a comparação da estrutura amostrada com a estrutura virginal dos comprimentos (Hordyk et al., 2015). A metodologia utiliza a estrutura do tamanho de uma população explotada e seu SPR como uma função da mortalide por pesca relativa (F/M), e as duas razões de história de vida, M/K e Lm/L , onde M é a taxa de mortalidade natural, K é o coeficiente de crescimento de von Bertalanffy, Lm é o tamanho de maturidade onde 50% e 95% de uma população está madura e L_∞ é o tamanho assintótico (Beverton, 1963; Hordyk et al., 2015; Pons et al., 2019a). O método é uma ferramenta valiosa para avaliação e o manejo da pesca pobre em dados, porque necessita de poucos de dados de entrada e é relativamente simples de entender e aplicar (Hordyk et al., 2015). Recentemente tem sido aplicado para a criação de regras de controle de captura para ajustar o nível de esforço pesqueiro para que o estoque atinja o SPR alvo

(Prince et al., 2015). O modelo LBSPR usa o método da máxima verossemelhança para estimar simultaneamente o comprimento no qual indivíduos em um estoque se tornam vulneráveis à captura e à mortalidade por pesca relativa, os quais são utilizados para calcular o SPR (Hordyk et al., 2015, 2016).

1.9 Stock Synthesis Data-limited tool

O Stock Synthesis (SS) é um modelo estatístico integrado de captura por idade vastamente utilizado para avaliações de estoque no mundo todo (Methot e Wetzel, 2013). O SS incorpora vários processos críticos acerca da dinâmica do estoque (mortalidade, recrutamento, seletividade, crescimento, etc.) que produz captura observada, tamanho, composição de idade, e taxas de CPUE (Cardoso et al., 2022). Apesar disso, devido a dificuldade da coleta de dados, a maioria dos estoque não possui tantas informações, o que dificulta uma avaliação de estoque confiável (Cope, 2013). Portanto, Cope (2013) criou uma abordagem simples do SS (Simple Stock Synthesis, SSS) para acessar estoques com dados limitados e logo depois a ferramenta SS Data-limited (SS - DL; Cope et al., 2020) para implementar vários métodos comuns de avaliação de estoque com dados limitados em uma única plataforma. A ferramenta constrói arquivos do SS para os dados e informação de história de vida fornecidos e produz gráficos e tabelas completos para cada modelo. Além disso, o SS – DL permite escolher entre estimar a mortalidade por pesca (F) ou fixar a captura, deixando-a constante. O SS – DL necessita que as amostras de comprimento sejam representativas do estoque em questão e requer como entrada parâmetros de crescimento de von Bertalanffy (L_{∞} , K, e t₀), a mortalidade natural, comprimento em 50% e 95% de maturidade (L50 e L95) e os coeficientes expoentes das relações comprimento-peso, steepness e recrutamento inicial (Cope, 2020). Esse método foi empregado com a finalidade de comparar os resultados gerados pelo método LB-SPR, pois apresenta um modelo semelhante integrado em sua plataforma, estimando o SPR para cada ano com os dados de comprimento disponíveis (Cope, 2020).

Dada a importância comercial para algumas localidades da costa brasileira e a falta de informação para auxiliar uma gestão assertiva do estoque SWA da albacorinha, esse estudo objetivou fornecer seu estado comparando valores de SPR estimados por dois métodos baseados em comprimento. Adicionalmente, nós analizamos a influência de cinco cenários de parâmetros

de crescimento e três valores de M/K no SPR para fornecer informações novas sobre diferenças desses dois métodos, o que pode ser aplicado para outras espécies, incluindo de pequenos tunídeos.

2. Material e Métodos

2.1 Área de studo e dados de comprimento

Os dados de comprimento furcal (CF) da albacorinha *Thunnus atlanticus* foram coletados de uma variedade de fontes entre 1998 e 2019, para avaliar o seu estoque do Atlântico Sudoeste. Essas fontes abrangem quase toda a costa do Brazil e são oriundos do a) Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica (REVIZEE), b) Expedição científica ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo, e c) Monitoramento de desembarques pesqueiros do Centro TAMAR/ICMBio, no âmbito do Projeto GEFMar ES/RJ (Fig. 2).





O teste de Mann–Whitney–Wilcoxon foi empregado para identificar diferenças entre os anos e regiões dada a diferença das artes de pesca empregadas para a captura da albacorinha, pois os comprimentos furcais (intervalo de classe = 2.0 cm) não seguiram os pressupostos do teste paramétrico (Tab. 1).

Tabela 1. Time-blocks para os parâmetros de seletividade definidos no modelo SS – DL para estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus*.

Time-block	Anos	n	Fonte	Área	Arte
1	1998 e 1999	424 e 500	REVIZEE	Nordeste do Brasil	Espinhel
2	2013	139	ASPSP	Arquipélago de São Pedro e São Paulo	Linha de mão
3	2019	1.932	TAMAR	Espírito Santo e Rio de Janeiro	Vara

2.2 Modelos baseados em comprimento

Os seguintes modelos baseados em comprimentos foram empregados para avaliar o estoque SWA da albacorinha:

1) Length-Based Spawning Potential Ratio (LBSPR):

O modelo LBSPR foi classificado como o método mais consistente, quando comparado com outros modelos de avaliação baseados em comprimentos, de acordo com Chong et al. (2020). Esse método requer como entrada dados de frequência de comprimento, assim como os parâmetros: (i) a razão M/K, (ii) o comprimento médio assintótico (L_{∞}) , (iii) o comprimento na primeira maturidade (L_{50}) e (iv) o comprimento em 95% (L_{95}) de maturidade. O modelo assume uma seletividade logística e estima a seletividade no comprimento e a razão F/M, o qual por sua vez é utilizado para calcular o *spawning potential ratio* (SPR) baseado na mortalidade natural (Hordyk et al., 2015).

2) Stock Synthesis Data–limited tool (SS – DL):

O Stock Synthesis Data-limited tool (SS – DL) é um ambiente estatístico de modelagem de captura na idade que permite o uso de várias fontes de dados para caracterizar a dinâmica populacional através do tempo (Cope, 2020). O SS-DL permite estimar o SPR com a utilização da plataforma Stock Synthesis adaptada para situações limitadas em dados. Esse método requer como entrada composições de comprimento representativas e parâmetros de história de vida como M,

crescimento de von Bertalanffy (L_{∞} , K, e t₀), comprimento em 50% e 95% de maturidade (L50 e L95), os coeficientes e expoentes das relações peso-comprimento e peso-fecundidade, os parâmetros de estoque-recrutamento, *steepness* e o recrutamento inicial (lnR₀).

A seletividade logística foi assumida, uma vez que as artes de pesca selecionam com elevada frequência indivíduos maiores e atuam sobre cardumes. Os parâmetros de seletividade foram estimados livremente em três *time blocks* para o SS – DL, uma vez que os dados de entrada foram provenientes de artes de pesca, regiões e fontes diferentes (Tab 1). Também foi assumida uma captura e F constantes. Além disso, o valor de *steepness* foi fixado em 0.7, como estimado pelo pacote *FishLife* (Thorson, 2020), enquanto que o recrutamento inicial foi livremente estimado pelo modelo.

O SPR foi estimado em quatro grupos, subexploração (>0.4), explotação moderada $(0.3 < SPR \le 0.4)$, recuperando ou sujeito a sobreexploração $(0.2 < SPR \le 0.3)$ e sobreexplotado (<0.2). Duas dessas categorias são comumente utilizadas como pontos de referência alvo (0.3 - 0.4) e limite (0.2) para remoção adequada do estoque (Mace, 1993; Mace, 1994; Magnuson-Stevens Fishery Conservation and Management Act, 1996; Clark, 2002).

2.3 Dados biológicos

A partir da informação encontrada na litreatura, cinco cenários foram criados para testar a incerteza dos parâmetros de crescimento e mortalidade com dados disponíveis na literatura (Tab. 2). As informações básicas incluíram comprimento máximo, parâmetros de crescimento de von Bertalanffy (L_{∞} , K, e t₀), e mortalidade natural (M). O L_{50} e L_{95} para a área de estudo estavam disponíveis em comprimento total e para sexos separados ($L_{50} = 47,12$ e $L_{95} = 51,53$; Bezerra et al., 2013), portanto foi realizada uma média entre macho e fêmea e para obter a informação em comprimento furcal a seguinte equação foi aplicada $CF = 0,135 \times CT + 1,046$ (Freire et al., 2015). А М foi estimada para cada cenário através da ferramenta online (<u>http://barefootecologist.com.au/shiny_m.html</u>) com quatro modelos empíricos: $M = aK^b L_{\infty}^{c}$ (Then et al., 2015); M = 1.5 K (Jensen, 1997); $Mx_m = 3 \text{ b}$ (Jensen, 1996); $M = Cm^a e^{(b/Tkelvin)}$ (Hamel, 2014). Além disso, para explorar a influência do M/K na composição de comprimento e

no SPR, M foi definido como o maior (M1 = 1,02) e o menor intervalo (M3 = 0,42) de confiança e a média (M2 = 0,72) da combinação dos cinco valores de M estimados (Tab. 2).

Tabela 2. Parâmetros de crescimento e mortalidade da albacorinha *Thunnus atlanticus* disponíveis na literatura (L_{∞} , comprimento assintótico; K, coeficiente de crescimento; M, mortalidade natural; M/K1, M = 1,02; M/K2, M = 0,72; M/K3, M = 0,42; L_{∞} está descrito em CF).

Cenário	Autor	Área de estudo	Método	\mathbf{L}^{∞}	K	Μ	M/K1	M/K2	M/K3
1	Garcia e Bosh, 1986	Cuba (Nordeste)	Espinho dorsal	78	0,33	0,522	3,09	2,18	1,27
2	Doray et al., 2004	Ilha de Martinique	Otólito	71,4	0,73	1,113	1,39	0,98	0,57
3	Adams e Kerstetter, 2014	EUA (Florida)	Otólito	95,3	0,28	0,441	2,79	1,97	1,15
4	Guttierrez, 2022	Golfo do México	Otólito	82,4	0,37	0,572	3,64	2,57	1,50
5	Freire et al., 2015	Brasil (Nordeste)	Frequência de comprimento	92	0,65	0,982	1,56	1,10	0,64

O programa R de estatística (versao 4.2.1) foi utilizado para realizar as análises estatísticas. O pacote *LBSPR* (Hordyk et al., 2015; <u>https://github.com/AdrianHordyk/LBSPR</u>) foi utilizado para aplicação do modelo LB-SPR e o pacote *r4ss* ("R Code for Stock Synthesis" Taylor et al., 2022; <u>https://github.com/r4ss/r4ss</u>) para aplicação do modelo SS-DL (Cope, 2020; <u>https://github.com/shcaba/SS-DL-tool.git</u>).

3. Resultados

3.1 Dados de comprimento

Dados de comprimento furcal (CF) estavam disponíveis para 1.929 indivíduos de amostragens de desembarques nos anos 1998, 1999, 2013 e 2019. O CF variou de 30,3 a 109 cm (60,76 \pm 9,51). O comprimento médio diferiu entre anos com o ano mais recente apresentando menor média de comprimento (Kruskal-Wallis = 246,83; df = 3; p < 0,05) (Fig. 3).



Figura 3. Variação do comprimento furcal por ano do estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* (letras diferentes indicam diferença estatística, teste de Kruskal-Wallis, posthoc de Dunn, p < 0.05).

3.2 Abordagens baseadas em comprimento e dados biológicos

A composição de comprimento modelada com os dados observados foi considerado satisfatório baseado no ajuste do modelo para todos os anos e cenários, o que significa uma boa representação da composição de comprimento observada (Material suplementar 1). A tabela 3 mostra os parâmetros utilizados para todos os cenários pelos métodos LBSPR e SS – DL.

Tabela 3. Parâmetros utilizados pelos modelos e como eles foram tratados (fixados ou estimados) pelos modelos para estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus*.

Parâmetros	SS – DL	Tratamento pelo SS – DL	LBSPR	Tratamento pelo LBSPR	
$L_{50}(cm)$	47,12	Fixado	47,12	Fixado	
$L_{95}(cm)$	51,53	Fixado	51,53	Fixado	
Comprimento (cm) - peso (g) alpha	0,0128	Fixado	N/A	N/A	
Comprimento (cm) - peso (g) beta	2,86	Fixado	N/A	N/A	
Coeficiente de fecundidade baseado em peso	0,001	Fixado	0,001	Fixado	
Expoente de fecundidade baseado em peso	1	Fixado	1	Fixado	
Steepness	0,7	Fixado	N/A	N/A	
Recrutamento inicial (lnR ₀)	8,08	Fixado	N/A	N/A	
	Time-block				

	1	2	3			
Comprimento na seletividade de 50% (cm)	48	61	42	Estimado	-	Estimado
Comprimento no pico da seletividade (cm)	55	69	47	Estimado	-	Estimado

3.3 Razões M/K e F/M e seletividade

Com o emprego de diferentes cenários, uma boa distribuição de valores de M/K foi encontrada, o que aumenta a confiabilidade dos dados (Material suplementar 2). Uma curva logística foi implementada para estimar o comprimento em 50% e 95% de captura (SL50 e SL95, respectivamente) por ano. Apesar de terem sido encontradas diferenças entre cenários na seletividade, todos os cenários apresentaram maiores comprimentos de captura do que de maturidade utilizados como entrada (L50 = 47,12 e L95 = 51,53; Bezerra et al., 2013) e um pequeno declínio de 1 cm na média de SL50 e 1,3 cm de SL95 (Fig. 4a, Material suplementar 3). Apesar disso, o único cenário com F/M <1 foi o Cenário 1 para toda a série temporal e o Cenário 2 para o final dos anos 90, ambos com a mortalidade mais alta. Adicionalmente, os primeiros quatro cenários apresentaram F/M entre 0,69 - 9,88 e o Cenário 5 apresentou os maiores valores de F/M encontrados entre 15 – 20 com a menor mortalidade e maior variação para toda a série temporal (Fig. 4b).



Figure 4. Comprimento em 50% e 95% de captura (a) e mortalidade por pesca relativa (b) para estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* pelo modelo LBSPR (linha vermelha, F/M = 1).

Os resultados da Fração do Potencial Reprodutivo (SPR) divergem entre os modelos. LBSPR mostra valores mais altos que o SS – DL para toda a série temporal, com excessão do Cenário 5. Apesar disso, o LB-SPR mostra maior variabilidade entre diferentes mortalidades e cenários de história de vida. Foi encontrado também uma depleção mais acentuada pelo LBSPR no SPR em média de 0,62 para 0,4 (12%) e um menor declínio pelo SS-DL de 0,43 para 0,30 (7%). Em 2019, quando aplicado o modelo LBSPR, 57% dos cenários mostraram que o estoque da albacorinha no Atlântico Sudoeste está subexplorado, 7% entre 0,3 e 0,4, 20% entre 0,2 e 0,3 e 20% sobreexplotado. Enquanto que no SS – DL foi encontrado subexplotação em 26,7% dos cenários, 26,7% tiveram um SPR entre o alvo de 0,3 e 0,4, 20% entre 0,2 e 0,3, e 26,6% mostraram sobreexplotação (Fig. 5).



Figura 5. SPR por ano com a composição de dados de comprimento disponível estimada pelos modelos LB-SPR (a) e SS – DL (b) para o estoque do SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* de acordo com diferentes estimativas baseadas em comprimento (verde = SPR>0,4; amarelo = $0,3 < SPR \le 0,4$; laranja = $0,2 < SPR \le 0,3$; vermelho = SPR $\le 0,2$; linha tracejada, SPR = 0,2).

Quando comparado o SPR no tempo entre os cenários, o LBSPR mostrou um declínio de 0,95 para 0,80 no cenário mais otimista e de 0,14 a 0,07 no cenário mais pessimista do final dos anos 90 a 2019 (Tab. 5). Adicionalmente, o Cenário 5 teve valores de SPR muito baixos quando estimados pelo LBSPR divergindo dos outros cenários, cujos parâmetros foram estimados no NWA. SS – DL resultou em menores valores de SPR quando comparados com o LBSPR e menor variabilidade entre mortalidades e cenários. Apesar disso, quando analizado por cenário, SS – DL identificou menores mudanças de 0,68 a 0,56 no cenário mais otimista e de 0,37 a 0,16 no cenário mais pessimista do final dos anos 90 a 2019 (Tab. 4).

Cenérios	M/K	LBSPR				SS – DL				
Cellarios	101/18	1998	1999	2013	2019		1998	1999	2013	2019
	M/K1	0,95	0,99	0,88	0,8		0,68	0,68	0,72	0,56
Cenário 1	M/K2	0,86	0,92	0,76	0,63		0,57	0,46	0,57	0,41
	M/K3	0,63	0,59	0,55	0,37		0,42	0,32	0,36	0,23
	M/K1	0,99	0,99	0,77	0,59		0,52	0,52	0,6	0,42
Cenário 2	M/K2	0,91	0,84	0,65	0,43		0,44	0,34	0,46	0,3
	M/K3	0,66	0,5	0,46	0,25		0,41	0,31	0,29	0,17
	M/K1	0,74	0,73	0,69	0,56		0,51	0,45	0,54	0,44
Cenário 3	M/K2	0,57	0,53	0,52	0,38		0,37	0,29	0,39	0,3
	M/K3	0,32	0,28	0,3	0,19		0,35	0,27	0,21	0,15
	M/K1	0,84	0,88	0,77	0,65		0,57	0,48	0,58	0,38
Cenário 4	M/K2	0,7	0,68	0,63	0,47		0,42	0,31	0,43	0,26
	M/K3	0,45	0,4	0,4	0,26		0,34	0,23	0,25	0,13
Cenário 5	M/K1	0,39	0,34	0,36	0,23		0,29	0,29	0,39	0,36
	M/K2	0,26	0,22	0,24	0,15		0,22	0,18	0,28	0,26
	M/K3	0,14	0,11	0,13	0,07		0,37	0,26	0,17	0,16

Tabela 4. Valores de SPR para cada cenário por mortalidade natural (M) e por ano gerados pelos modelo LBSPR e SS – DL (verde, SPR>0,4; amarelo, $0,3 < SPR \le 0,4$; laranja, $0,2 < SPR \le 0,3$; vermelho, SPR ≤ 20 ; M/K1, M = 1,02; M/K2, M = 0,72; M/K3, M = 0,42).

O método LBSPR estimou um declínio maior de 12% em média, enquanto que o SS – DL estimou um declínio mais leve de 7% em média do final dos anos 90 em comparação com o ano mais atual. No geral, a albacorinha no Atlântico Sudoeste se encontra com uma exploração adequada, mas sendo necessário maiores esforços na coleta de dados da espécie para evitar uma sobrexploração futura.

3.5 Composição virginal do estoque

Diferenças foram encontradas entre os cenários e M/K quando comparados a composição de comprimento virginal estimada com a atual com o LBSPR. Todas as composições virginais aumentaram a frequência de indivíduos maiores (>80 cm) quando menores valores de M/K foram empregados. O mesmo ocorreu para os cenários, no qual o Cenário 1 mostrou as menores e o Cenário 5 as maiores frequência de maiores indivíduos (>80 cm) devido aos valores de entrada do L $_{\infty}$ encontrados na literatura para a albacorinha. Adicionalmente, os valores maiores e médios de M/K parecem estimar frequências de indivíduos mais realistas com a composição de comprimento observada, pois demonstram uma composição virginal mais condizente com a realidade da pesca da espécie (Material suplementar 4).

4. Discussão

No presente estudo foi fornecido, pela primeira vez, evidências do estado do estoque do Atlântico Sudoeste da albacorinha comparando o SPR estimado por dois modelos baseados em comprimento. Ambos modelos resultaram em tendências similares de declínio do SPR ao longo do tempo, apesar de diferenças nos valores absolutos e taxa de mudanças.

Diversos fatores influenciam na baixa disponibilidade de dados de comprimento, o que prejudicam a avaliação precisa do estado dos estoques da albacorinha. Esses fatores incluem a descontinuidade da coleta de dados, má identificação da espécie e baixo valor comercial (Arocha et al., 2012; Fenton et al., 2015; Freire et al., 2015). Apesar disso, no presente estudo foram reunidos quatro anos de composições de comprimento de três fontes de dados ao longo do estoque do Atlântico Sudoeste (SWA) da albacorinha. Esses dados foram considerados representativos para o ajuste no modelo devido ao número adequado de indivíduos amostrados em cada ano e à distribuição normal de cada composição de tamanho. Adicionalmente, as composições de comprimento e tamanho médio diferiram entre os anos e regiões, indicando diferenças na composição de captura da albacorinha no SWA. Essas diferenças estão relacionadas às artes de pesca utilizadas e áreas e períodos de coleta distintos empregados para capturar a albacorinha ao longo do estoque SWA (Fenton et al., 2015).

O modelo LBSPR apresentou maior variabilidade nos valores de SPR estimados ao longo da série temporal comparado com o SS – DL. Isso pode ocorrer devido ao efeito e à importância

dos parâmetros de história de vida no LBSPR, o qual é extremamente sensível aos parâmetros de entrada (Hordyk et al., 2014). Consequentemente, quando há grande variabilidade nos parâmetros de crescimento para uma dada espécie, SS – DL mostra uma melhor performance dando uma estimação menos variável do SPR. Em contraste, o LBSPR apresenta menor variação do SPR para populações depletadas (Hordyk et al., 2015), com o Cenário 5 mostrando menor variação entre as mortalidades empregadas em comparação com os outro cenários. Para incorporar as diferentes artes de pesca das fontes de dados de comprimento, foram utilizados no modelo SS – DL três *timeblocks* para os parâmetros de seletividade, o que resultou em um ajuste adequado da composição de comprimento. Por outro lado, no LBSPR não é possível ajustar a série temporal em blocos, pois o modelo estima a seletividade para cada ano individualmente. Além disso, o modelo SS – DL considera parâmetros que o LBSPR não requer como entrada, como *steepness* e recrutamento, por exemplo. Portanto, diferenças encontradas entre os resultados dos modelos também podem estar relacionadas ao tratamento da seletividade por cada modelo, e às relações de história de vida mais complexas performadas pelo SS – DL.

A razão M/K influencia no formato da composição de comprimento virginal e a curva de von Bertalanffy está diretamente relacionada com o SPR (Horyk et al., 2014). Embora a literatura apresente uma ampla variação nos valores de M/K relatados para peixes (Pauly, 1980; Beverton, 1992), o valor de M/K = 1.5 é comumente adotado quando não há informações disponíveis para todos os parâmetros (Hordyk et al., 2014). No entanto, neste estudo, os valores de M/K foram especificados, então o viés está associado com a estimação de L_∞ devido à aproximação utilizando o comprimento máximo observado. Ao analisar a ampla variação de M/K (0.5 - 3.4), foi encontrado divergências significantes entre e dentro dos cenários entre modelos, o que tem consequências importantes para os pontos de referência e, consequentemente, para o manejo. Além disso, a ampla variação de M/K empregada mostra a variabilidade de M em cada cenário. A relação M/K, como expressão da história de vida, mostrou-se um bom preditor de estimadores de mortalidade baseados em comprimento, apresentando melhor desempenho em cenários com alto M/K em comparação com baixo M/K (Huynh et al., 2018). Ambos os modelos baseados em comprimento mostraram valores baixos de SPR em situações com baixo M/K. O M/K exerce uma forte influência no desempenho dos modelos baseados em comprimento, com pior desempenho em baixo M/K (Hordyk et al., 2015; Huynh et al., 2018). Huynh et al. (2018) encontraram que situações com baixo M/K são mais propensas a apresentar viés positivo, superestimando as

mortalidades mesmo em situações em equilíbrio, e alertaram o uso de métodos baseados em comprimento em populações com baixo M/K. Quando M/K é baixo, o pico da distribuição de frequência de comprimento pode não corresponder ao comprimento real da seletividade total. Portanto, cenários com valores médios e altos de M/K seriam considerados mais apropriados para avaliar a albacorinha no SWA.

Uma curva logística de seletividade foi assumida e foi encontrado que todos os cenários tinham maiores valores de comprimento na seletividade (SL) quando comparados com os comprimentos de maturidade (Lm). Quando o comprimento na seletividade é maior que o comprimento de maturidade, a arte de pesca não captura peixes imaturos e seleciona indivíduos maiores, dando oportunidade para reproduzir pelo menos uma vez antes de serem capturados, portanto compensando o impacto da pesca e assegurando a sustentabilidade da biomassa desovante (Froese, 2004). Apesar disso, a maior parte dos cenários tenderam a um leve declínio nos valores SL ao longo da série temporal. Adicionalmente, valores muito altos de F/M foram encontrados para a maioria dos cenários e valores de M/K. A razão F/M pode oferecer um indicador do impacto relativo da pressão pesqueira porque o múltiplo de M é frequentemente utilizado como um proxy para a pesca no rendimento máximo sustentável (e.g., FMSY = 0,75; Zhou et al., 2012). Portanto, diferenças encontradas na mortalidade por pesca relativa explicam a incerteza associada à estimação do SPR atual pelo modelo LBSPR, uma vez que reduções diferentes de indivíduos em cada classe de comprimento comparada às classes de comprimento virginais resultam em valores diferentes de SPR. Ademais, uma vez que as artes de pesca apenas selecionam indivíduos maturos, uma pesca sustentável pode estar presente, sendo necessário valores extremamente altos de F/M para reduzir o SPR abaixo de 0,4, o que é o caso da maioria dos cenários no presente estudo (Hordyk et al., 2014). Além disso, SS – DL mostrou valores menores de SL do que Lm para 2019. Isso pode ter ocorrido devido à recente expansão do estoque SWA da albacorinha para o Sul do Brasil, na qual indivíduos adultos estão sendo recentemente mais capturados ao longo do tempo devido à itensificação da corrente do Brasil (Cardoso et al., 2021).

Cinco cenários foram aplicados (Tab. 2). Cenário 1 - 4 foram estrutrados com parâmetros estimados para o NWA e o Cenário 5 foi o único cenário representante dos parâmetros estimados com amostras do SWA. Informações de história de vida do NWA foram testadas com dados de composição de comprimento do SWA para avaliar a incerteza dos parêmtros de crescimento e

mortalidade na avaliação de estoque da albacorinha, uma vez que informações sobre a dinâmica populacional da albacorinha permanecem mal acessadas com poucos estudos abordando esta questão (e.g., Bezerra et al., 2013; Freire et al., 2015). O Cenário 5 demonstrou valores mais baixos que os outros cenários, mas com maior diferença quando avaliado pelo método LBSPR, apresentando os maiores e irrealísticos valores de F/M. É importante ressaltar que os parâmetros de crescimento usados no Cenário 5 foram estimados usando apenas métodos baseados em comprimento, o que requer vários pressupostos como reprodução sazonal rápida e definida, crescimento rápido nas primeiras idades e distribuição de comprimentos modais, o que parece não ser o caso da albacorinha. Isso aumenta a necessidade de estudos de crescimento que utilizam técnicas mais precisas.

O Cenário 1 apresentou os valores de SPR mais otimistas, enquanto que os cenários 2-4 mostraram valores intermediários de SPR. Essas diferenças podem estar relacionadas com a relação dos parâmetros da função de von Bertalanffy L_∞ e K que são negativametne correlacionados para a maior parte das espécies de peixes (Xiao, 1994; Pilling et al., 2002). Portanto, o Cenário 1 é mais otimista devido a valores relativamente baixos, e Cenário 5 é mais pessimista devido a altos valores de ambos L_∞ e K. Por isso, diferenças podem estar relacionadas a diferentes padrões de crescimento dos estoques ou devido a diferentes metodologias aplicadas entre estudos (e.g., espinhos, otólitos, frequência de comprimento), o que influencia a estimação dos valores de SPR. Sobretudo, o Cenário 1 com valores intermediários de M/K podem representar melhor a composição virginal do estoque Sudoeste da albacorinha, uma vez que a maior parte dos adultos são selecionados pelas artes de pesca (Material suplementar 4).

Em relação aos valores de SPR, o modelo LBSPR parece ser mais otimista com 80% dos cenários indicando subexploração ou uma exploração adequada, em contaponto com o o SS – DL, que é mais pessimista com 53,4%. Além disso, ambos os métodos também mostram valores abaixo do limite (0,2) no final da série temporal, alarmando a possibilidade de uma futura sobreexploração. Adicionalmente, apesar de levar em consideração menos parâmetros, a tendência de SPR do LBSPR ao longo do tempo parece ser mais razoável, levando em conta que a albacorinha no SWA tem poucos registros de captura desde 1960 (Lucena-Frédou et al., 2021). Apesar disso, os valores de SPR encontrados pelo SS – DL devem ser considerados devido à alta mortalidade por pesca relativa (F/M > 1) para a maioria dos cenários e à alta variabilidade no SPR

encontrada para o LBSPR. Portanto, considerando o Cenário 1 com o modelo SS -DL, podemos classificar o estoque SWA da albacorinha dentro dos níveis aceitáveis de exploração. Contudo, qualquer esforço ou mortalidade direcionado sem ações de manejo podem colocar o estoque em risco de decair abaixo do limite crítico de 20% de SPR e se tornar sobreexplorado.

No geral, o presente estudo destaca a necessidade de estimações de parâmetros de vida mais precisos e a coleta periódica de dados da albacorinha no SWA devido à sua importância para a avaliação do estado do estoque. Além disso, apesar de modelos pobre em dados serem a melhor alternativa para estimar o estado desses estoques, nós temos que levar em conta suas limitações, como poucos dados de comprimento anuais utilizados na série temporal, e a incerteza dos parâmetros de história de vida. Portanto, apesar dos resultados apresentados neste trabalho sugerirem uma explotação sustentável do estoque, maiores esforços no monitoramento de desembarques, programas de observadores de bordo e coleta de dados de comprimento e captura para a albacorinha devem ser considerados, levando em conta que atuns maiores podem estar enfrentando sobrepesca, assim como a sua importância para a cadeia econômica de base, principalmente no Nordeste do Brasil, bem como sua contribuição para a segurança alimentar desses locais (Freire et al., 2015; Lucena-Frédou et al., 2021). Adicionalmente, estudos que abordem a história de vida da albacorinha, especialmente aquales voltados para estimativas de parâmetros relacionados ao crescimento, no Atântico Sudoeste devem ser encorajados para estimar com maior precisão o estado do estoque SWA da albacorinha devido à sua importância no modelo.

5. Conclusões

A albacorinha no Atlântico Oeste está dividida em dois grandes estoques em expansão de distribuição, um estoque mais bem definido no Atlântico Noroeste e o outro que carece de informações de biologia e pesca no Atlântico Sudoeste. Foram definidas áreas prioritárias de coleta de tecido muscular para análise molecular e desenvolvimento larval para melhor estruturação da população da espécie e conhecimento dos seus limites no Atlântico Sudoeste. As áreas aqui ressaltadas foram definidas por ocorrer importantes capturas da espécie e por terem uma distância razoável para uma estruturação populacional mais adequada. Além disso, mais atenção deve ser

dada à população residente no Arquipélago de São Pedro e São Paulo pela sua semelhança com ambos os estoques definidos encontrado por Saillant et al. (2022).

No presente estudo, o estoque da albacorinha no Atlântico Sudoeste foi avaliado através de moedelos baseados em comprimento para pescarias e espécies pobres em dados. Foram utilizados dois modelos que derivam valores de SPR, os quais, diante dos cenários em que foram submetidos, tiveram resultados distintos. Apesar dos resultados do LBSPR fazerem mais sentido, devido ao baixo registro de captura da espécie desde 1960 no banco de dados da ICCAT para o Atlântico Sudoeste, o SS-DL permite inserir mais informação e ajustar o modelo para melhor adequação à realidade da espécie e dos dados fornecidos. Portanto, seus valores devem ser considerados até que uma avaliação com uma série temporal maior e informações mais adequadas para o estoque em questão sejam realizadas. No geral, a albacorinha no Atlântico Sudoeste se encontra com uma exploração adequada, mas sendo necessário maiores esforços na coleta de dados da espécie para evitar uma sobrexploração futura.

Considerando a abordagem precautória de medidas de manejo, o esforço atual pode ser mantido e a espécie deve ser monitorada por programas de coletas de dados para estatística pesqueira. A coleta de dados de comprimento deve ser incentivada, devido à captura da espécie na costa brasileira (a qual compreende todo o estoque da albacorinha no Atlântico Sudoeste até o conhecimento atual), ser majoritariamente proveniente da fauna acompanhante de peixes maiores. Além disso, coletas de dados de comprimento em Baía Formosa e Areia Branca – Rio Grande do Norte devem ser priorizadas devido à abundância sazonal da espécie e importância para a cultura da população da região. Essas recomendações têm o intuito de aumentar a qualidade dos dados fornecidos aos modelos de avaliação para reduzir a incerteza dos resultados do estado do estoque da espécie e fornecer uma status mais assertivo à comunidade científica e ao governo brasileiro.

Referências

Adams, J., Kerstetter, D., 2014. Age and growth of three coastal-pelagic tunas (Actinopterygii: Perciformes: Scombridae) in the Florida Straits, USA: blackfin tuna, *Thunnus atlanticus*, little tunny, *Euthynnus alletteratus*, and skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 44(3): 201-211. https://doi.org/10.3750/AIP2014.44.3.04

Arocha, F., Barrios, A., Marcano, J., Gutierrez, X., 2012. Blackfin tuna (Thunnus atlanticus) in

the Venezuelan fisheries. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 68(3): 1253-1260.

Babcock, E. A.; Tewfik, A.; Burns-Perez, V. 2018. Fish community and single-species indicators provide evidence of unsustainable practices in a multi-gear reef fishery. *Fisheries research*, v. 208, 70-85. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.07.003

Bangma, J. Contemporary population structure and historical demography of sailfish (*Istiophorus platypterus*) in the Atlantic Ocean Master thesis, Texas A&M University (2006).

Bezerra, N. P. A. et al. 2013. Reproduction of Blackfin tuna *Thunnus atlanticus* (Perciformes: Scombridae) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic, Brazil. *Rev. Biol. Trop.* 61, 1327–1339.

Beverton, R. J. H. 1992. Patterns of reproductive strategy parameters in some marine teleost fishes. *Journal of Fish Biology*, 41: 137–160.

Bremer, J. R. A. et al. 2005a. Comparative phylogeography of Atlantic bluefin tuna and swordfish: the combined effects of vicariance, secondary contact, introgression, and population expansion on the regional phylogenies of two highly migratory pelagic fishes. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, v. 36, n. 1, p. 169-187. 10.1016/j.ympev.2004.12.011

Bremer, J. R A. et al. 2005b. Hierarchical analyses of genetic variation of samples from breeding and feeding grounds confirm the genetic partitioning of northwest Atlantic and South Atlantic populations of swordfish (*Xiphias gladius L.*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, v. 327, n. 2, p. 167-182. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.06.022

Brooks, E. E. N.; Powers, J. J. E.; Cortés, E. 2010. Analytical reference points for age-structured models: application to data-poor fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 67: 165 – 175. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp225

Cardoso, L. G.; Sant'anna, R.; Freire, M. A.; Weigert, S. C.; Poubel, M.; Bezerra, N. 2021. The southward expansion of the distribution and fishing grounds of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* in the southwestern Atlantic Ocean due to increasing water temperatures. ICCAT SCRS/2021/084.

Cardoso, L. G. et al. 2022. What can the size data tell us about the Western Atlantic Skipjack tuna stock? Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 79 (1): 239-246.

Carles Martin C. A. 1991. Composicion por especies de las capturas de tunidos con vara en Cuba. SCRS/91/61.

Carvalho, G.R.; Hauser, L. 1994. Molecular genetics and the stock concept in fisheries. *Rev Fish Biol Fisheries* 4, 326–350. <u>https://doi.org/10.1007/BF00042908</u>

Chong, L.; Mildenberger, T. K.; Rudd, M. B.; Taylor, M. H.; Cope, J. M.; Branch, T. A., ... Stäbler, M. 2019. Performance evaluation of data-limited, length-based stock assessment methods. *ICES J. of Mar. Sci*, 77(1), 97-108. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz212</u>

Chrysafi, A.; Kuparinen, A. 2016. Assessing abundance of populations with limited data: Lessons learned from data-poor fisheries stock assessment. *Environ. Rev.*, v. 24, n. 1, p. 25–38. https://doi.org/10.1139/er-2015-0044

Clark, W. G. W. 2002. F35% revisited ten years later N. Am. J. Fish Manag. 22: 251–257. https://doi.org/10.1577/1548-8675(2002)022<0251:FRTYL>2.0.CO;2 Cope, Jason M. Implementing a statistical catch-at-age model (Stock Synthesis) as a tool for deriving overfishing limits in data-limited situations. *Fisheries Research*, v. 142, p. 3-14, 2013.

Cope, J. 2020. The Stock Synthesis Data-limited Tool (SS-DL tool). https://github.com/shcaba/SS-DL-tool#the-stock-synthesis-data-limited-tool-ss-dl-tool. Accessed November 06, 2022.

Cope, J. M., Dowling, N. A., Hesp, S. A., Omori, K. L., Bessell-Browne, P., Castello, L., ... & Prince, J. (2023). The stock assessment theory of relativity: deconstructing the term "data-limited" fisheries into components and guiding principles to support the science of fisheries management. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1-23. <u>https://doi.org/10.1007/s11160-022-09748-1</u>

Doray, M.; Reynal, L.; Carpentier, A. 2002. Les pêcheries de poissons pélagiques hauturiers aux Petites Antilles en 2001. Supplement to the Report of the First meeting of the WECAFC Ad-hoc Working Group on the Development of Sustainable Moored Fish Aggregating Device Fishing in the Lesser Antilles, FAO Fish. Rep. 683.

Doray, M., Stéquert, B., & Taquet, M. 2004. Age and growth of blackfin tuna (Thunnus atlanticus) caught under moored fish aggregating devices, around Martinique Island. *Aquatic Living Resources*, 17(1), 13–18. <u>https://doi.org/10.1051/alr:2004009</u>

Dowling, N.A., Smith, A.D.M.; Smith, D.C.; Parma, A.M.; Dichmont, C.M.; Sains-bury, K.; Wilson, J.R.; Dougherty, D.T.; Cope, J.M. 2019. Generic solutions for data-limited fishery assessments are not so simple. *Fish Fish.*, v. 20, n. 1, p. 174–188. <u>https://doi.org/10.1111/faf.12329</u>

Ely, B. et al. 2005. Consequences of the historical demography on the global population structure of two highly migratory cosmopolitan marine fishes: the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*). *BMC Evolutionary Biology*, v. 5, p. 1-9. https://doi.org/10.1186/1471-2148-5-19

Fenton, J., Ellis, J. M.; Falterman, B.; Kerstetter, D. W. 2015. Habitat utilization of blackfin tuna, Thunnus atlanticus, in the north-central Gulf of Mexico. *Environmental Biology of Fishes* 98: 1141–1150. <u>https://doi.org/10.1007/s10641-014-0347-3</u>

Freire, K.; Lessa, R.; Lins-Oliveira, J. E. 2015. Fishery and biology of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* off Northeastern Brazil. *Gulf Caribb. Res.* 17: 15-24. https://doi.org/10.18785/gcr.1701.02

Froese, R. 2004. Keep it simple: three indicators to deal with overfishing. *Fish and Fisheries*. 5: 86-91. <u>10.1111/j.1467-2979.2004.00144.x</u>

Garcia, C. I.; Bosh, A. M. 1986. Determinacion de la edad y el crecimiento del bonito, Katsuwonus pelamis y la albacora, *Thunnus atlanticus* en la region nororiental de Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 7 (3): 47-54.

Gutierrez, E. M., Age and growth of blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) in the Gulf of Mexico" (2022). *LSU Master's Theses*. 5536. <u>https://10.31390/gradschool_theses.5536</u>

Hamel, O. S. 2015. A method for calculating a meta-analytical prior for the natural mortality rate using multiple life history correlates. *ICES Journal of Marine Science* 72, 62-69. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu131</u>

Heithaus, M. R.; Frid, A.; Wirsing, A. J.; Worm, B. 2008. Predicting ecological consequences of marine top predator declines. *Trends Ecol. Evol.*, v. 23, p. 202–210. https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.01.003

Hilborn, R.; Amoroso, R. O.; Anderson, C. M.; Baum, J. K.; Branch, T. A.; Costello, C.; ... Ye, Y. 2020. Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 2218-2224. <u>https://doi.org/10.1073/pnas.1909726116</u>

Holt, S. J. 1958. The evaluation of fisheries resources by the dynamic analysis of stocks, and notes on the time factors involved. *ICNAF Special Publication*, I: 77–95.

Hordyk, A.; Ono, K.; Sainsbury, K.; Loneragan, N.; Prince, J. 2014. Some explorations of the life history ratios to describe length composition, spawning-per-recruit, and the spawning potential ratio. *ICES Journal of Marine Science*, 72: 204–216 <u>10.1093/icesjms/fst235</u>

Hordyk, A; Ono, K; Valencia, S; Loneragan, N.; Prince, J. 2015. A novel length-based empirical estimation method of spawning potential ratio (SPR), and tests of its performance, for small-scale, data-poor fisheries. *ICES J Mar Sci*, 72:217–231. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu00

Hordyk, A. R. et al. A simple length-structured model based on life history ratios and incorporating size-dependent selectivity: application to spawning potential ratios for data-poor stocks. Canadian *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 73, n. 12, p. 1787-1799, 2016. https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0422

Huynh, Q. C.; Beckensteiner, J.; Carleton, L. M.; Marcek, B. J.; Nepal, K. C. V.; Peterson, C. D.; Wood, M. A.; Hoenig, J. M. 2018. Comparative Performance of Three Length-Based Mortality Estimators. *Mar Coast Fish*, 10: 298-313. <u>https://doi.org/10.1002/mcf2.10027</u>

ICCAT, 2006. Report for biennial period, 2004-05 PART II (2005) - Vol. 2., Executive Summaries on species: Small Tunas: 128-135.

ICCAT. Access to ICCAT statistical databases. Task I Excel, MS Excel pivot table to obtain nominal catches of Atlantic tunas and tuna-like fish (including sharks), by gear, region and flag, version 03/2015, 5 Mb (rar). 2015.

ICCAT, 2019. International Comission for the Conservation of Atlantic Tuna. Statistical Bulletin. Vol.45. Disponível em: https://www.iccat.int/sbull/SB45-2019/index.html

Ingram, G. W.; Alvarez-Berastegui, D.; Reglero, P.; Balbín, R.; García, A; Alemany, F. Incorporation of habitat information in the development of indices of larval bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Western Mediterranean Sea (2001–2005 and 2012–2013), *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Volume 140, 2017, Pages 203-211, https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.03.012.

Jensen, A.L. 1996. Beverton and Holt life history invariants result from optimal trade-off of reproduction and survival. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53: 820-822.

Jensen, A.L. 1997. Origin of the relation between K and L_{∞} and synthesis of relations among life history parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54: 987-989.

Juan-Jordá, M.J.; Mosqueira, I.; Freire, J.; Dulvy, N. K. 2015. Population declines of tuna and relatives depend on their speed of life. *Proc R Soc B Biol Sci*, 282. https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0322 Kindong, R.; Gao, C.; Pandong, N. A. M. Q.; Tian, S., Wu, F., Sarr, O. 2020. Stock status assessments of five small pelagic species in the Atlantic and Pacific Oceans using the length-based bayesian estimation (LBB) method. *Front Mar Sci* (7). <u>https://doi.org/10.3389/fmars.2020.592082</u>

Klaer, N. L.; Wayte, S. E.; Fay, G. 1907. An evaluation of the performance of a harvest strategy that uses an average-length-based assessment method. Fisheries Research, v. 134, p. 42-51, 2012.Lotka, A.J. Relation between birth rates and death rates. Science, v. 26, p. 21–22.

Lee, H.-H., Maunder, M. N., Piner, K. R.; Methot, R. D. 2011. Estimating natural mortality within a fisheries stock assessment model: an evaluation using simulation analysis based on twelve stock assessments. *Fisheries Research*, 109: 89–94. <u>10.1016/j.fishres.2011.01.021</u>

Lotka, A.J. 1907. Relation between birth rates and death rates. Science, v. 26, p. 21–22.

Lucena-Frédou, F.; Kell, L.; Frédou, T.; Gaerrner, D.; Potier, M.; Bach, P.; Travassos, P.; Hazin, F.; Ménard, F. 2017a Vulnerability of teleosts caught by the pelagic tuna longline fleets in South Atlantic and Western Indian Oceans. *Deep Sea Res Part II* 140: 230–241. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.10.008

Lucena-Frédou, F.; Frédou, T.; Ménard, F. 2017b Preliminary ecological risk assessment of small tunas of the Atlantic Ocean. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 73:2663–2678.

Lucena-Frédou, F. ; Mourato, B. ; Frédou, T. *et al.* 2021. Review of the life history, fisheries, and stock assessment for small tunas in the Atlantic Ocean. *Rev Fish Biol Fisheries* 31, 709–736 <u>https://doi.org/10.1007/s11160-021-09666-8</u>

Luckhurst, B. E.; Trott T.; Manuel, S. 2001. Landings, seasonality, catch per unit effort and tagrecapture results of yellowfin tuna and blackfin tuna at Bermuda. *American Fisheries Society Symposium*, 25, 225–234.

Mace, P. M.; Sissenwine, M. P. 1993 How much spawning per recruit is enough? In 'Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management' (Eds Smith SJ, Hunt JJ and Rivard D) *Can Spec Publ Fish Aquat Sci* 120: 101-108.

Mace, P. M. 1994. Relationships between common biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 51 :110-122

Mahon, R.; Mahon, S. Seasonality and migration of pelagic fishes in the eastern Caribbean. FAO expert consultation on shared fishery resources in the Lesser Antilles. Mayaguez, Puerto Rico. 273 pp, 1986.

Methot, J. R., Richard, D.; Wetzel, C. R. 2013. Stock synthesis: a biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research*, v. 142, p. 86-99. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.10.012

Myers, R.; Worm, B. 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280–283. <u>https://doi.org/10.1038/nature01610</u>

Narváez, M.; Ariza, L.; Evaristo, E.; Bermudez, R.; Marcano, J.H.; Gutierrez, X; Arocha, F. 2017. Blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) updates on catch, effort and size distribution from Venezuelan fisheries. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 74(1): 82-9.

Nikolic, N. et al. 2020. Connectivity and population structure of albacore tuna across southeast Atlantic and southwest Indian Oceans inferred from multidisciplinary methodology. *Sci. Rep.* 10,
15657.https://doi.org/10.1038/s41598-020-72369-w

Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. Journal du Conseil/Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer 39: 175–192.

Pecoraro, C. et al. 2018. The population genomics of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at global geographic scale challenges current stock delineation. *Sci. Rep.* 8, 13890. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32331-3

Pilling, G. G. M.; Kirkwood, G. P.; Walker, S. G. 2002. An improved method for estimating individual growth variability in fish, and the correlation between von Bertalanffy growth parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 424–432. https://doi.org/10.1139/f02-022

Pons, M.; Kell, L.; Rudd, M. B.; Cope, J. M.; Lucena-Frédou, F. 2019a. Performance of lengthbased data-limited methods in a multifleet context: application to small tunas, mackerels, and bonitos in the Atlantic Ocean. *ICES J Mar Sci* 76 (4): 960–973. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz004</u>

Pons, M.; Lucena-Frédou, F.; Frédou, T.; Mourato, B. 2019b Implementation of length-based and catch-based data limited methods for small tunas. SCRS/2019/063.

Prince, J. et al. 2015. Length based SPR assessment of eleven Indo-Pacific coral reef fish populations in Palau. *Fisheries Research*, v. 171, p. 42-58. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.06.008

Punt, A. E. 2006. The FAO Precautionary Approach after almost 10 years: have we progressed towards implementing simulation-tested feedback-control management systems for fisheries management? *Natural Resource Modeling*, 19: 441-464.

Quinn, T. J.; Deriso, R. B. Quantitative fish dynamics. Oxford university Press, 1999.

Reglero, P.; Tittensor, D. P.; Alvarez-Berastegiu, D.; Aparicio-Gonzalez, A.; Worm, B., 2014. Worldwide distributions of tuna larvae: revisiting hypotheses on environmental requirements for spawning habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, v. 501, p. 207–224. <u>10.3354/meps10666</u>

Reis, E.G. 1992. An assessment of the exploitation of the white croaker Micropogonias furnieri (Pisces, Scianidae) by the artisanal and industrial fisheries in coastal waters of southern Brazil. PhD Thesis. University of East Anglia, 212 pp.

Saillant, E. A. ; Luque, P. L. ; Short, E. *et al.* 2022. Population structure of blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) in the western Atlantic Ocean inferred from microsatellite loci. *Sci Rep* 12, 9830 https://doi.org/10.1038/s41598-022-13857-z

Saxton, B. L. 2009. Historical Demography and Genetic Population Structure of the Blackfin Tuna (*Thunnus atlanticus*) from the Northwest Atlantic Ocean and the Gulf of Mexico. Texas Taylor & Francis.

SCRS (2019) Report of the 2019 ICCAT small tuna species group intersessional meeting. Olhão, Portugal, 52pp

Smith, S. E.; Au, D.W.; Show, C. 2008. Intrinsic rates of increase in pelagic elasmobranchs. In: M.D. Camhi, E.K. Pikitch & E.A. Babcock (ed.) Sharks of the Open Ocean: Biology, Fisheries and Conservation Blackwell, Oxford, U.K.

Smith, W. S.; Espíndola, E. L.G.; Rocha, O. 2014. Environmental gradient in reservoirs of the medium and low Tietê River: limnological differences through the habitat sequence. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 26(1), 7-88. http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2014000100009

Sun, M.; Zhang, C.; Chen, Y.; Xu, B; Xue, Y.; Ren, Y. 2018. Assessing the sensitivity of datalimited methods (DLMs) to the estimation of life-history parameters from length–frequency data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 75 (10): 1563-1572. https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0325

Taylor, I. G. et al., 2022. r4ss: R code for Stock Synthesis. R package version 4.2.2. https://github.com/r4ss/r4ss

Then, A.Y.; Honeig, J. M.; Hall, N.G.; Hewitt, D.A. 2015. Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species. *ICES Journal of Marine Science* 72(1): 82-92. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx199

Thorson, J. T. 2019. Predicting recruitment density dependence and intrinsic growth rate for all fishes worldwide using a data-integrated life-history model. *Fish and Fisheries*. https://doi.org/10.1111/faf.12427

Vieira, K., Oliveira, J.L.; Barbalho, M.C.; Aldatz, J. 2005. Aspects of the dynamic population of blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*-Lesson, 1831) caught in the Northeast Brazil. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT. 58: 1623-1628.

Wayte, S. E.; Klaer, N. L. An effective harvest strategy using improved catch-curves. Fisheries Research, v. 106, n. 3, p. 310-320, 2010. <u>https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.012</u>

Walters, C. J.; Martell, S. J. D. 2004. Fisheries Ecology and Management. Princeton University Press, Princeton, USA.

Zapadaeva N. 2021. Updated life history parameters and estimates of spawning potential ratio for frigate tuna *Auxis thazard* stock in the Northeast Atlantic. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT 78: 93–102.

Zavala-Camin, L. A.; Grassi, R. T. B.; Seckendorff, R. W. V.; Tiago, G. G. 1991. Ocorrência de recursos pesqueiros epipelágicos na posição 22°11'S, 039°55'W, Brasil. *Boletim do Instituto de Pesca 18*, 13–21.

Xiao, Y. 1994. von Bertalanffy growth models with variability in, and correlation between, K and L1. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51: 1585–1590.











Composição de comprimento modelada empregada pelo LBSPR (linhas pretas) e SS – DL (linhas vermelhas) ajustadas aos dados anuais observados para o estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* (Cenário 1: a = M1, b = M2, c = M3; Cenário 2: d = M1, e = M2, f = M3; Cenário 3: g = M1, h = M2, i = M3; Cenário 4: j = M1, k = M2, l = M3; Cenário 5: m = M1, n = M2, o = M3; M1 = 0.96, M2 = 0.66, and M3 = 0.35).



Distribuição do M/K dos parâmetros encontrados para a albacorinha *Thunnus atlanticus* na literatura.

			SL	.50				SL	.95			F/M			
Cenários	M/K	1998	1999	2013	2019		1998	1999	2013	2019	1998	1999	2013	2019	
	M/K1	64	63,37	63,29	62,96		75,72	74,81	74,53	74,39	0,69	0,71	0,8	0,8	
Cenário 1	M/K2	63,27	62,59	62,62	62,33		76,16	75,09	74,92	74,85	1,35	1,38	1,52	1,53	
	M/K3	62,86	62,19	62,28	61,98		77,61	76,4	76,24	76,18	3,32	3,38	3,67	3,68	
	M/K1	60,81	60,46	60,87	60,79		74,24	73,44	73,7	73,94	0,88	0,96	1,15	1,21	
Cenário 2	M/K2	60,04	59,74	60,27	60,23		74,61	73,73	74,1	74,4	1,6	1,74	2,02	2,11	
	M/K3	59,53	59,3	59,92	59,89		75,84	74,84	75,24	75,56	3,86	4,12	4,68	4,86	
	M/K1	64,39	63,63	63,51	63,17		76,9	75,77	75,44	75,28	1,54	1,52	1,63	1,62	
Cenário 3	M/K2	64,22	63,44	63,35	63		77,96	76,72	76,38	76,23	2,66	2,64	2,81	2,79	
	M/K3	64,02	63,22	63,17	62,82		79,32	77,94	77,59	77,45	5,84	5,81	6,15	6,12	
						1									
	M/K1	65,89	64,87	64,57	64,13		78,1	76,88	76,36	76,1	2,74	2,63	2,69	2,63	
Cenário 4	M/K2	65,64	64,7	64,43	64		79,43	78,05	77,47	77,21	4,6	4,4	4,48	4,39	
	M/K3	65,46	64,6	64,34	63,93		81,09	79,51	78,86	78,59	9,88	9,43	9,56	9,38	
						1									
	M/K1	65,54	64,59	64,34	63,92		80,22	78,74	78,17	77,93	6,44	6,19	6,33	6,22	
Cenário 5	M/K2	65,61	64,62	64,37	63,94		80,97	79,41	78,8	78,56	9,62	9,25	9,45	9,3	
	M/K3	65,67	64,65	64,4	63,97		81,78	80,12	79,49	79,24	17,37	16,71	17,05	16,8	

Valores de SL50, SL95 e F/M por ano e M/K encontrados pelo LBSPR para o estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* (M/K1, M = 1,02; M/K2, M = 0,72; M/K3, M = 0,42).





Composição de comprimento virginal (salmão) e composição de comprimento observada (azul) estimadas pelo LBSPR em 2019 para o estoque SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* (Cenário 1: a = M1, b = M2, c = M3; Cenário 2: d = M1, e = M2, f = M3; Cenário 3: g = M1, h = M2, i = M3; Cenário 4: j = M1, k = M2, l = M3; Cenário 5: m = M1, n = M2, o = M3; M1 = 0.96, M2 = 0.66, and M3 = 0.35).

Lista de Tabelas

Tabela 1.	. Time-blocks	para os	parâmetros	de seletividade	definidos	no modelo	• SS –	DL para
estoque S	WA da albaco	orinha <i>Th</i>	nunnus atlan	ticus				15

Tabela 2. Parâmetros de crescimento e mortalidade da albacorinha *Thunnus atlanticus* disponíveis na literatura (L_{∞} , comprimento assintótico; K, coeficiente de crescimento; M, mortalidade natural; M/K1, M = 1,02; M/K2, M = 0,72; M/K3, M = 0,42; L_{∞} está descrito em CF).....17

Tabela 4. Valores de SPR para cada cenário por mortalidade natural (M) e por ano gerados pelos modelo LB-SPR e SS-DL (verde, SPR>0,4; amarelo, $0,3 < SPR \le 0,4$; laranja, $0,2 < SPR \le 0,3$; vermelho, SPR ≤ 20 ; M/K1, M = 1,02; M/K2, M = 0,72; M/K3, M = 0,42).....21

Lista de Figuras

Figura 5. SPR por ano com a composição de dados de comprimento disponível estimada pelos modelos LB-SPR (a) e (b) para o estoque do SWA da albacorinha *Thunnus atlanticus* de acordo com diferentes estimativas baseadas em comprimento (verde, SPR>0,4; amarelo, 0,3<SPR $\leq 0,4$; laranja, 0,2<SPR $\leq 0,3$; vermelho, SPR ≤ 20 ; linha tracejada, SPR = 0,2)......21

Apêndice I: Artigo submetido à revista Regional Studies in Marine Science

Assessment of the stock status of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* in the Southwest Atlantic Ocean: a length-based approach

Abstract

The majority of small scombrids remain unassessed due to the lack of catch and effort data, which hampers the use of several stock assessment models. The blackfin tuna *Thunnus atlanticus* is a small tuna species distributed in the West Atlantic Ocean falling in the same data lacking and has never been assessed regarding its stock status. Some evidences shows that two stocks in expansion occur along its distribution; one in the Northwest Atlantic and another in the Southwest Atlantic. The aim of the present study was to estimate the status of the Southwestern stock using lengthbased models. A total of four years of length data was gathered (1998, 1999, 2013 and 2019) from a variety of sources with a total of 1,929 individuals. Two length-based models were applied, Length-Based Spawning Potential Ratio (LBSPR) and Stock Synthesis Data-limited tool (SS -DL) and five scenarios combining a set of growth parameters (asymptotic length, L_{∞} , and growth constant, K) were built to accommodate different life histories available in the literature. The natural mortality (M) was estimated through four empirical methods and three time-blocks were used to accommodate the selectivity of different fishing gears through time and, in general, the length at selectivity were larger than the length at first maturity. However, high relative fishing mortality (F/M > 1) were found at most scenarios, given that the fishery only selects mature fish, and high F/M values may be present even if the stock shows high SPR values. The LBSPR estimated higher values of SPR than the SS – DL, however, it presented a steeper decline than SS - DL, between the late 90's and 2019. This may have happened due to differences of selectivity parameters estimated by each model. In addition, growth parameters influence the estimation of the virginal stock, and intermediate and high M/K values seem to represent better the estimated length composition, given the low historical catch of the species. Overall, the blackfin tuna Southwestern Atlantic stock might be classified with a proper exploitation with a decreasing SPR trend over time (12% LBSPR and 7% SS – DL). Even with the limited data, we could have a proxy of stock status estimation by using length-based models which highlights the importance of such data. However, due to the high uncertainty of the results, better collection of catch, effort and

length data should be considered. Additionally, SS – DL seems to estimate better SPR values when variability of growth parameters are placed for a given species.

Key-words: data-limited, ICCAT, small tuna, SPR, uncertainty.

Introduction

Stock assessment of large tunas have been performed regularly, and a variety of management procedures are in place to protect them from overfishing (Pons et al. 2017). However, although small tuna species represent 17% of total reported catch of tuna and tuna-like species in the Atlantic to the International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna (ICCAT, https://www.iccat.int/en/accesingdb.html) only two out of 12 small tuna species had their stock recently assessed in the Atlantic Ocean (Juan-Jordá et al. 2015; Pons et al. 2018; Pons et al., 2019a,b; Lucena-Frédou et al., 2021). The majority of small tuna stocks are classified as "datalimited" due to the lack of data to support a fully integrated stock assessment model, therefore remaining unassessed (Juan-Jordá et al., 2015; Kingdong et al., 2020; Lucena-Frédou et al., 2021; Cope et al. 2023). Since stock assessments are the basis for taking the most appropriate management measures to ensure a sustainable and healthier population (Punt et al. 2006, Hilborn et al. 2020), the lack of basic knowledge makes these species stocks vulnerable to several stressors like overfishing and climate change effects (Pons et al., 2019b; Lucena-Frédou et al., 2021). Furthermore, it is well known that highly migratory fish as tunas lack physical barriers and have weak population structure throughout large geographic areas (Pecorato et al., 2018; Nikolic et al., 2020), which increases the complexity of defining the stocks to be assessed and managed. Thus, the urgent need for information that will support stock assessments and consequently management measures is evident.

The blackfin tuna *Thunnus atlanticus* is one example of unassessed small tuna species and is distributed exclusively in the West Atlantic from Massachusetts, USA (40° N) to South Brazil (35° S) (Mahon e Mahon, 1986, Zavala-Camin et al., 1991; Cardoso et al., 2021). This species is an important target for artisanal and recreational fisheries of many developed and developing countries in the West Atlantic (e.g., Cuba, Venezuela, Bermuda, Dominican Republic, Brazil, USA) (Carles Martin, 1991; Luckhurst et al., 2001; Freire et al., 2015; ICCAT, 2006; Narváez et

al., 2017). Moreover, recent studies reported that blackfin populations are divided in those of Northwestern (NWA) and Southwestern (SWA) Atlantic (Saxton, 2009; Saillant et al., 2022). Some few fishery-dependent data information are available regarding its stock in the NWA. Lucena-Frédou et al. (2021) reported a slight decline in the mean size from 70 to 60 cm in the purse seine catches, but a stable trend in annual mean length in general, and Saillant et al., 2022 reported a noticeable increase of 70% in its landings from USA recreational fishing from the 80's to 2019. Regarding SWA stock, a single report of estimated catches was found from 1993 to 2001 where removals were 33.5 (16.8 to 48.6) tons a year on average (Freire et al., 2015). However, no assessment was performed for both stocks up to date. Moreover, many tuna stocks had decreased over time in the SWA (Lucena-Frédou et al., 2021), which increase the need for the assessment of blackfin SWA stock.

The Brazilian Exclusive Economic Zone (EEZ) holds most of the SWA distribution area of blackfin, playing an important role to coastal fisheries in some Brazilian regions (Freire et al., 2005). For example, in Baía Formosa – RN, at NE Brazil, this species is targeted by small hand line vessels and off Northern and Southwestern it is harvested as bycatch of larger tuna, billfish, and shark longline fisheries (Vieira et al., 2005; Freire et al., 2015). Despite the importance of blackfin to food security in some locations in Brazil, continuous time series of catch are unavailable in ICCAT database for the South Atlantic Ocean. Moreover, the discontinuity in data collection is a reality in developing countries (Reis, 1992) and this gap hampers the application of more robust stock assessment models. However, several size samples have been collected by Brazilian research projects along time, which increases the amount of models to evaluate the stock status.

In addition, size composition data are more applicable than catch data to stock assessment of small tuna species (Pons et al., 2019a; Lucena-Frédou et al., 2021). Therefore, many well-studied length-based assessment models can be employed for the effective management of many fish populations (Hilborn and Walters, 1992), thus also to the SWA blackfin stock. Two methods were applied in the present study, the Length-Based Spawning Potential Ratio (LBSPR; Hordyk et al., 2014, 2015) and Stock Synthesis Data Limited tool (SS – DL; Cope, 2020). LBSPR is a methodology that uses representative length compositions in a population model based in equilibrium and compare the sampled and the expected unfished size structure (Hordyk et al.,

2015). SS – DL was recently created to implement many common data-limited methods in a single framework using the age structured Stock Synthesis to assess data limited stocks (Methot and Wetzel, 2013, Cope, 2020).

Moreover, assuming that the size composition is representative from the exploited population, these models estimate a biological reference point entitled spawning potential ratio (SPR), which is commonly used as an indicator for recruitment overfishing in data limited fisheries (Hordyk et al., 2014; Chong et al., 2020). SPR determines limits and targets referential points to subsidize management decisions (Brooks et al., 2010; Hordyk et al., 2015; Sun et al., 2017; Pons et al., 2019a; Chong et al., 2019). Virginal stocks have a SPR of 100%, which decreases when the stock is submitted to a certain fishery (Hordyk et al., 2014). Additionally, to estimate SPR values, LBSPR also use life history ratios, as M/K, F/M and Lm/L_∞ (M, natural mortality; K, growth coefficient; F, fishing mortality; Lm, length at maturity; L∞, asymptotic length) (Hordyk et al., 2014). However, this is also a problem for blackfin in the SWA, because most of life-history parameters (e.g., L_{∞} and K) are estimated for NWA (*i.e.*, Garcia and Bosh, 1986; Doray et al., 2004; Adams and Kerstetter, 2014; Gutierrez, 2022). Freire et al. (2015) is the single study that presents values for SWA assessing growth parameters with length-frequency data from the late 90's. Life-history information is crucial to assess fish species stocks and length-based models are very sensible to these parameters (Hordyk et al., 2014). Additionally, M is the most difficult parameter to estimate in natural populations (Lee et al., 2011). Therefore, in the present study scenarios divided by a set of growth parameters and M/K values were created to test uncertainty of SPR estimation.

Given the commercial importance to some localities of Brazilian coast and the lack of information to assist in the proper management of blackfin stock in the Southwestern Atlantic Ocean, this study aimed to provide the stock status by comparing SPR values estimated from two length-based methods. Additionally, we analyzed the influence of five scenarios of growth parameters and three M/k values in the SPR to provide novel information about differences of these two methods, which can be applied to other species, including small tunas species.

Methodology

Study area and length data

Blackfin tuna *Thunnus atlanticus* furcal length (FL) data were gathered from a several sources, between 1998 and 2019, to assess the Southwestern Atlantic stock encompassing most of the Brazilian coast. The data sources included a) Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica (REVIZEE), b) Scientific expeditions to Saint Peter and Saint Paul Archipelago (ASPSP), and c) Landings at TAMAR/ICMBio Center – GEFMar ES/RJ Project (TAMAR) (Fig. 1).



Figure 1. Study area and length composition by year and data source of SWA blackfin tuna *Thunnus atlanticus* stock (a, REVIZEE; b, ASPSP; c, TAMAR).

Since FL data (size classes = 2.0 cm) did not follow the necessary assumptions for the parametric test, we employed the nonparametric Kruskal–Wallis followed by Dunn's post-hoc to test differences among years and regions due to differences in fishing gears employed to harvest blackfin (Tab. 1).

Table 1. Time-block for the selectivity parameters set in the SS – DL model for the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock.

Time-block	Years n		Source	Area	Gear		
1	1998 and 1999 424 and 500 REVIZEE		Brazilian northeast	Longline			
2	2013	139	ASPSP	Saint Perter and Saint Paul Archipelago	Handline		
3	2019	1.932	TAMAR	Espírito Santo and Rio de Janeiro	Pole and line		

Length-based methods

The following length-based models were used to assess the SWA blackfin stock:

1) Length-based Spawning Potential Ratio (LBSPR):

The LBSPR method is the most consistent and accurate, when comparing with other lengthbased assessment models, according to Chong et al. (2020). This method requires as input a representative length composition, and the following life-history parameters: (i) the M/K ratio, (ii) the mean asymptotic length (L_{∞}), (iii) the length at first maturity (L_{50}) and (iv) the length at 95% (L_{95}) of maturity. The model assumes logistic selectivity and estimates the selectivity-at-length and the F/M ratio, which in turn are used to calculate the spawning potential ratio (SPR) based on the natural mortality (Hordyk et al., 2015).

2) Stock Synthesis Data-Limited Tool (SS – DL):

The Stock Synthesis Data limited tool (SS – DL) is a likelihood-based statistical catch-atage modeling environment allowing multiple data sources to be used to characterize population dynamics through time (Cope, 2020). The SS – DL tool allows the SPR estimation by using the stock synthesis framework adapted to data limited situations. This method requires as input a representative length composition, and the life-history parameters as *M*, the von Bertalanffy growth parameters (L_{∞} , k and t₀), the size at 50% and 95% of maturity (L_{50} and L_{95}), the coefficients and exponents of the weight-length and the weight-fecundity relationships, the stockrecruitment parameters, steepness, and initial recruitment (lnR₀).

The selectivity was assumed to be logistic, since fishing gears often select larger individuals and catch over schools. The selectivity parameters were freely estimated in three timeblocks, since input data came from different fishing gears, regions and data source (Tab. 1). The built model also assumed constant catch and F. In addition, the steepness value was fixed at 0.7, as estimated with the *FishLife* package (Thorson, 2020), while initial recruitment was freely estimated in the model.

SPR was classified in four groups, under (>0.4), moderate ($0.3 < SPR \le 0.4$), recovering or subject to over ($0.2 < SPR \le 0.3$), and over exploitation (≤ 0.2). Two of these categories have been

employed as a target (0.3 - 0.4) and limit (0.2) reference points to an accurate and proper removal of the stock (Mace, 1993; Mace, 1994; Magnuson-Stevens Fishery Conservation and Management Act, 1996; Clark, 2002).

Life history

Five scenarios were created to test the uncertainty on growth and mortality parameters with data available in the literature (Tab. 2). Basic information included maximum length, von-Bertalanffy parameters (L_{∞} , K, and t_0), and natural mortality (M). L50 and L95 for the study area were available in total length and to separated sex ($L_{50} = 47,12$ and $L_{95} = 51,53$; Bezerra et al., 2013), therefore, the mean of male and female values were calculated and to obtain the information in furcal length the following equation was applied $FL = 0.135 \times TL + 1.046$ (Freire et al., 2015). Μ was estimated to each scenario through the online tool (<u>http://barefootecologist.com.au/shiny_m.html</u>) with four empiric models: $M = aK^b L_{\infty}^{c}$ (Then et al., 2015); M = 1.5 K (Jensen, 1997); $Mx_m = 3 \text{ b}$ (Jensen, 1996); $M = \text{Cm}^{\text{a}} e^{(\text{b/Tkelvin})}$ (Hamel, 2014). Moreover, to explore the influence of M/K in length composition and SPR, M was defined as the highest (M1 = 1.02), and lowest (M3 = 0.42) values of confidence interval and the mean (M2 = 0.72) of the five M values estimated (Tab. 2).

Tabel 2. Growth and mortality parameters of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* available in literature (L_{∞} , asymptotic size; K, growth rate; M, natural mortality; M/K1, M = 1.02; M/K2, M = 0.72; M/K3, M = 0.42; L_{∞} is described in FL).

Scenario	Author	Study area	Method	L^{∞}	K	Μ	M/K1	M/K2	M/K3
1	Garcia and Bosh, 1986	Cuba (Northeast)	Dorsal spine	78	0.33	0.522	3.09	2.18	1.27
2	Doray et al., 2004	Martinique Island	Otolith	71.4	0.73	1.113	1.39	0.98	0.57
3	Adams and Kerstetter, 2014	USA (Florida)	Otolith	95.3	0.28	0.441	2.79	1.97	1.15
4	Gutierrez, 2022	Gulf of Mexico	Otolith	82.4	0.37	0.572	3.64	2.57	1.50
5	Freire et al., 2015	Brazil (Northeast)	Length frequency	92	0.65	0.982	1.56	1.10	0.64

All statistical analysis were performed using R (version 3.4.4).We employed the packages *LBSPR* (Hordyk et al., 2015; <u>https://github.com/AdrianHordyk/LBSPR</u>) to apply LBSPR model

and the r4ss ("R Code for Stock Synthesis" Taylor et al., 2022; <u>https://github.com/r4ss/r4ss</u>) to apply SS – DL (Cope, 2020; <u>https://github.com/shcaba/SS-DL-tool.git</u>).

Results

Length Data

Furcal length (FL) data was available to 1,929 individuals from landings samplings between the years 1998, 1999, 2013 and 2019. FL ranged from 30.3 to 109 cm (60.76 ± 9.51). The mean furcal length differed among years with the most recent one presenting the lowest mean length (Kruskal-Wallis = 700.6; df = 6; p = 0) (Fig. 2).



Figure 2. Mean furcal length by year for the of the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock (different letters indicate statistical difference, Kruskal-Wallis test, Dunn's post hoc, p < 0.05).

Length-based approaches and life history

The fit of the modeled size composition to the observed data was considered satisfactory to all years, models and scenarios, which means a good representation of the observed size composition (Supplementary material 1). Table 3 shows parameters used to all scenarios by the LBSPR and SS – DL methods.

Parameters	S	S – C	DL	SS – DL Treatment	LBSPR	LBSPR Treatment
$L_{50}(cm)$		47.12	2	Fixed	47.12	Fixed
$L_{95}(cm)$		51.53	3	Fixed	51.53	Fixed
Length (cm) - weight (g) alpha	(0.012	8	Fixed	N/A	N/A
Length (cm) - weight (g) beta		2.86		Fixed	N/A	N/A
Weight-based fecundity coefficient	0.001			Fixed	0.001	Fixed
Weight-based fecundity exponent	1			Fixed	1	Fixed
Steepness		0.7		Fixed	N/A	N/A
Initial recruitment (lnR ₀)		8.08		Fixed	N/A	N/A
	Tir	ne-bl	ock			
	1	2	3			
Length at 50% selectivity (cm)	48	61	42	Estimated	-	Estimated
Length at peak selectivity (cm)	55	69	47	Estimated	-	Estimated

Table 3. Models parameters and how they were treated (fixed or estimated) of the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock.

M/K and F/M ratios and selectivity

With the employment of different scenarios, a good distribution of M/K values were found, which increases data reliability (Supplementary material 2). A logistic selectivity curve was employed to estimate length at 50% and 95% at capture (SL50 and SL95, respectively) by year. Although were found differences among scenarios in selectivity, all scenarios presented higher length at first capture than length at first maturity used as input (L50 = 47.12 and L95 = 51.53 FL; Bezerra et al., 2013) and a slight decrease of 1 cm in SL50 and 1.3 cm in SL95 in average (Fig. 4a, Supplementary material 3). However, the only scenario with F/M <1 were the Scenario 1 to all time-series and Scenario 2 for the late 90's, both with the highest mortality. In addition, the first four scenarios presented F/M between 0.69 - 9.88 and Scenario 5 presented the highest values of F/M found in the class of 15 - 20 with the lowest mortality and higher variation to all time series (Fig. 4b).



Figure 4. Length at 50% (SL50) and 95% (SL95) of capture (a) and relative fishing mortality (F/M) (b) of the SWA blackfin stock by LBSPR model (red line, F/M = 1).

<u>SPR</u>

SPR output differed between methods. LBSPR shows higher values than SS – DL to all time-series, with the exception of Scenario 5. However, LBSPR results show high variability between different mortalities and life-history scenarios. Additionally, LBSPR showed a more marked depletion in the average SPR from 0.62 to 0.40 (12%) and SS – DL showed a slight decrease from 0.43 to 0.30 (7%). In 2019, when employed the LBSPR model, 60% of scenarios showed that the Southwestern Atlantic blackfin stock is underexploited, 20% between 0.3 and 0.4, 20% within 0.2 and 0.3 and 20% that is overexploited. Whilst with SS – DL were found that 26.7% of scenarios showed an underexploited stock, 26.7% had an SPR within the target of 0.3 - 0.4, 20% between 0.2 and 0.3, and 26.6% showed overexploitation (Fig. 5).



Figure 5. SPR by year with the available length composition data estimated by LBSPR (a) and SS – DL (b) models to SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock according to different estimations based in length (green, SPR>0.4; yellow, $0.3 < SPR \le 0.4$; orange, $0.2 < SPR \le 0.3$; red, $SPR \le 0.2$; dashed line, SPR = 0.2).

When comparing the SPR for the same scenarios through time, the LBSPR showed a decrease of 0.95 to 0.80 in the most optimistic scenario and of 0.14 to 0.07 in the most pessimistic scenario from the late 90's to 2019 (Tab. 5). Additionally, Scenario 5 shows very low SPR values when estimated in LBSPR diverging from the other scenarios whose parameters were estimated in the NWA. SS – DL outputs resulted in lower SPR values when compared with the LBSPR outputs, and lower variability among different mortalities and model scenarios. However, when comparing the results for the same scenarios through time, the SS – DL showed smaller changes from 0.68 to 0.56 in the most optimistic scenario and from 0.37 to 0.16 in the most pessimistic scenario from the late 90's to 2019 (Tab. 5).

Table 5. SPR by scenario, M/K and estimated by LBSPR and SS - DL models to SWA b	lackfin
stock according to different estimations based in length (green, SPR>0.4; yellow, 0.3 <sp< td=""><td>R≤0.4;</td></sp<>	R≤0.4;
orange, 0.2 <spr≤0.3; k1,="" k2,="" k3,="" m="0.42)</td" red,="" spr≤0.2;=""><td></td></spr≤0.3;>	
	_

Scenarios	M/K		LBS	SPR		SS – DL						
Secharios	101/10	1998	1999	2013	2019	1998	1999	2013	2019			
Sconorio	M/K1	0.95	0.99	0.88	0.8	0.68	0.68	0.72	0.56			
1	M/K2	0.86	0.92	0.76	0.63	0.57	0.46	0.57	0.41			
1	M/K3	0.63	0.59	0.55	0.37	0.42	0.32	0.36	0.23			
Sconorio	M/K1	0.99	0.99	0.77	0.59	0.52	0.52	0.6	0.42			
2	M/K2	0.91	0.84	0.65	0.43	0.44	0.34	0.46	0.3			
Z	M/K3	0.66	0.5	0.46	0.25	0.41	0.31	0.29	0.17			
Sconorio	M/K1	0.74	0.73	0.69	0.56	0.51	0.45	0.54	0.44			
2	M/K2	0.57	0.53	0.52	0.38	0.37	0.29	0.39	0.3			
3	M/K3	0.32	0.28	0.3	0.19	0.35	0.27	0.21	0.15			
Comorio	M/K1	0.84	0.88	0.77	0.65	0.57	0.48	0.58	0.38			
Scenario	M/K2	0.7	0.68	0.63	0.47	0.42	0.31	0.43	0.26			
4	M/K3	0.45	0.4	0.4	0.26	0.34	0.23	0.25	0.13			
	M/K1	0.39	0.34	0.36	0.23	0.29	0.29	0.39	0.36			

Scenario	M/K2	0.26	0.22	0.24	0.15	0.22	0.18	0.28	0.26
5	M/K3	0.14	0.11	0.13	0.07	0.37	0.26	0.17	0.16

The LBSPR method estimated a greater decrease of 12% in average, while the SS – DL estimated a slight decreased of 7% in average from late 90's to 2019. Overall, blackfin tuna in the Southwest Atlantic is being properly exploited, with regards of more effort in data collection to avoid future exploitation.

Virginal stock composition

Differences were found among scenarios and M/K when compared the estimated virginal and current length composition with LBSPR. All estimated virginal composition increased the frequency of larger individuals (>80 cm) when lower values of M/K were employed. The same is true for the scenarios, which Scenario 1 showed the lowest and Scenario 5 the highest frequencies of larger individuals (>80 cm) due to input values of L_{∞} found in literature for blackfin. In addition, the highest and mean values of M/K seem to estimate more realistic frequencies of individuals to the observed length composition (Supplementary material 4).

Discussion

In the present study was provided for the first time, evidences of the status of the Southwest Atlantic blackfin stock by comparing the spawning potential ratio (SPR) estimated with two length-based methods. Both methods resulted in similar trends of decreasing SPR through time, despite differences on the absolute values and the rate of changes.

Many factors may influence the availability of data that can contribute to an accurate stock assessment of fish species, such as discontinuity of data collection, species misidentification and the low commercial value (Arocha et al., 2012; Fenton et al., 2015; Freire et al., 2015). However, in this paper were gathered four years of size composition from three data sources throughout the SWA blackfin stock distribution. These data were considered representative of blackfin population

due to the large number of individuals sampled each year and the normal distribution of each size composition. In addition, size composition and mean size differed among years and regions, indicating differences in blackfin tuna catch composition in the SWA. These differences are related to different areas, periods of collection and fishing gears employed to harvest blackfin tuna in the SWA (Fenton et al., 2015).

To accommodate the different gear of sources of length data, three time-blocks for selectivity parameters were used in the SS – DL model, which resulted in good fits to the length compositions. However, in LBSPR a single curve of selectivity was employed to all time-series. Moreover, SS – DL model take into account parameters that LBSPR do not require, as steepness and recruitment. Therefore, great differences found between models outputs may be related to the treatment of selectivity by each model, and the more complex life history relationships performed by the SS – DL. LBSPR presented higher variability in the estimated SPR values through time-series compared to SS – DL. This may happen due to the effect and importance of parameters to LBSPR model, which is very sensible to input parameters (Hordyk et al., 2014). Therefore, when high variability of parameters is assigned for a given species, SS – DL shows better performance giving a less biased estimation of SPR. However, LBSPR presents less SPR variation for more depleted populations (Hordyk et al., 2015), this is why Scenario 5 is less variable among mortalities in comparison with the other scenarios.

The M/K ratio influences the shapes of the unfished length composition and the von Bertalanffy curve is directed related to the SPR (Hordyk et al., 2014). Although the range of M/K reported in the literature for fish varies a lot (Pauly, 1980; Beverton, 1992), the M/K = 1.5 is often used when data are not available for all parameters (Hordyk et al., 2014). However, M/K values were specified, so the main bias was associated with the estimations of L_{∞} due to the approximation using maximum observed length. By examining a wide range of M/K (0.5–3.4), we found significant divergence among and within scenarios between models, which have important consequences for reference point and hence management. Additionally, the great variation of M/K values a good predictor of length-based mortality estimators, with better performance in high-M/K scenarios compared to low-M/K scenarios (Huynh et al., 2018). Both length-based methods presented very low SPR in situations with low M/K. M/K ratio strongly affects the performance

of length-based methods, with poor performance at low M/K (Hordyk et al., 2015; Huynh et al., 2018). Huynh et al. (2018) found that low-M/K situations are likely to be positively biased overestimating mortalities even in equilibrium situations, and alarmed the usage of length-based methods with low-M/K population. When M/K is low, the peak of the LFD may not correspond to the true length of full selectivity. Thus, scenarios with mean and high M/K values would be considered more appropriate to assess blackfin SWA stock.

A logistic selectivity curve was assumed and found that all scenarios had higher values of lengths at selectivity (SL) when compared to lengths at maturity (Lm). When length at selectivity is higher than maturity, fishing gear do not target immature fish and selects larger individuals, giving them the opportunity to reproduced at least once before being caught, hence compensating fishing impact and thus ensuring the sustainability of the spawning biomass (Froese, 2004). However, most of the scenarios tend to a slight decrease of SL values through time-series. In addition, very high F/M values were found to the majority of the scenarios and M/K values. The F/M ratio can provide an indication of the relative impact of fishing pressure because a scalar multiple of M is often used as a proxy for fishing at maximum sustainable yield (e.g., FMSY = 0.75; Zhou et al., 2012). Therefore, differences found in relative fishing mortality explain the uncertainty associated to the current SPR estimation by LBSPR model, since different reduction of individuals in each length class compared to the virginal composition classes results in different SPR values. Moreover, since fishing gear only selects mature individuals, a sustainable fishery (high SPR) with very high F/M may be present, and SPR values declining at a slower rate, requiring much higher F/M values to reduce SPR under 0.4, which is the case for most scenarios (Hordyk et al., 2014). In addition, SS – DL found a lower SL value than Lm to 2019. This may happen due to the recent blackfin expansion in the SWA to the Brazilian South, which adults individuals are being caught increasingly more throughout the time (Cardoso et al., 2021).

Five scenarios were applied (Tab. 2). Scenario 1 - 4 were structured with parameters estimated for the NWA and Scenario 5 was the only scenario representing parameters estimated with samples from the SWA. NWA life history information was tested with SWA length composition data to evaluate the uncertainty of growth and mortality parameters in the assessment of blackfin stock since information about blackfin population dynamics in the SWA remain poorly assessed with few studies addressing this issue (Bezerra et al., 2013; Freire et al., 2015). Scenario

5 demonstrated the lowest values of SPR among scenarios, but with a greater difference when estimated by LBSPR model, presenting the highest and probably unrealistic values of F/M. It is important to point out that the growth parameters used in the Scenario 5 were estimated using length only methods, which requires several assumptions as short and defined reproductive season, fast growth in the first ages and distinct modals length distribution, which seems no to be the case of the blackfin tuna. This highlights the needs for growth studies using more accurate ageing techniques.

The Scenario 1 presented the most optimistic SPR values, while Scenarios 2 - 4 showed intermediate values of SPR. These differences may be related to the relationship of L_{∞} and K parameters of the von Bertalanffy function found to be negatively correlated for the most port of fish species (Xiao, 1994; Pilling et al., 2022). Therefore, Scenario 1 is more optimistic due to relative low values, and Scenario 5 is more pessimistic due to high values of both L_{∞} and K parameters. Thus, differences may be related to different patterns of the two different stocks growth, or due the different methodologies applied among studies (e.g., spines, otoliths, length-composition), which influence the estimation of the SPR values. Overall, Scenario 1 with intermediate M/K values might represent better the virginal composition of blackfin SWA stock, since most part of the adults are selected by the fishing gears (Supplementary material 4).

Regarding the SPR values, LBPSR seems more optimistic with 80% of the scenarios indicating under exploitation and target exploitation of the stock. However, when compared to LBSPR, SS – DL is more pessimistic with 53.4% of scenarios indicating under exploitation and target exploitation. Moreover, both methods also show values under 0.2 at the end of the time series, thus alarming the possibility of future over-exploitation. In addition, LBSPR trend in time series seems to be more reasonable, taking into account that blackfin tuna in SWA tuna has few harvest records since 1960 (Lucena-Frédou et al., 2021). However, SPR from SS – DL should be considered due to the high variability of the SPR estimations by LBSPR, and high relative fishing mortalities (F/M > 1) to most of scenarios. Therefore, taking into account Scenario 1 from SS – DL, we may classify blackfin tuna SW Atlantic stock within the acceptable levels of exploitation. However, any direct fishing effort or mortality without management actions would likely put the stock at risk of falling below the 20% SPR critical threshold and becoming overexploited.

Overall, the present study highlights the need for more precise estimation of life history parameters and the periodic data collection of blackfin in the SWA due to their importance to the assessment of stock status. In addition, although data-poor models are the best alternative to estimate stock status of data-limited species, we have to take into account their limitation, as few annual length data used as time-series, and the uncertainty of life history parameters. Therefore, although the results presented in this paper suggest a sustainable level of exploitation for the SWA blackfin stock, more effort in monitoring landings, length composition samplings and report of catch data for blackfin should be considered, taking into account that some larger tunas may be facing overexploitation (Lucena-Frédou et al., 2017). Additionally, studies addressing the life history of blackfin, especially the ones addressing estimates of growth parameters, in the Southwest Atlantic should be encouraged to estimate with more accuracy the stock status of SW blackfin due to their impact on the model.

References

Adams, J., Kerstetter, D., 2014. Age and growth of three coastal-pelagic tunas (Actinopterygii: Perciformes: Scombridae) in the Florida Straits, USA: blackfin tuna, *Thunnus atlanticus*, little tunny, *Euthynnus alletteratus*, and skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*. Acta Ichthyologica et Piscatoria, 44(3): 201-211. https://doi.org/10.3750/AIP2014.44.3.04

Arocha, F., Barrios, A., Marcano, J., Gutierrez, X., 2012. Blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) in the Venezuelan fisheries. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 68(3): 1253-1260.

Babcock, E. A.; Tewfik, A.; Burns-Perez, V. 2018. Fish community and single-species indicators provide evidence of unsustainable practices in a multi-gear reef fishery. *Fisheries research*, v. 208, 70-85. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.07.003

Bezerra, N. P. A. et al. 2013. Reproduction of Blackfin tuna *Thunnus atlanticus* (Perciformes: Scombridae) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic, Brazil. *Rev. Biol. Trop.* 61, 1327–1339.

Beverton, R. J. H. 1992. Patterns of reproductive strategy parameters in some marine teleost fishes. *Journal of Fish Biology*, 41: 137–160.

Brooks, E. E. N.; Powers, J. J. E.; Cortés, E. 2010. Analytical reference points for age-structured models: application to data-poor fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 67: 165 – 175. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp225

Cardoso, L. G.; Sant'anna, R.; Freire, M. A.; Weigert, S. C.; Poubel, M.; Bezerra, N. 2021. The southward expansion of the distribution and fishing grounds of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* in the southwestern Atlantic Ocean due to increasing water temperatures. ICCAT SCRS/2021/084.

Carles Martin C. A. 1991. Composicion por especies de las capturas de tunidos con vara en Cuba.

SCRS/91/61.

Chong, L.; Mildenberger, T. K.; Rudd, M. B.; Taylor, M. H.; Cope, J. M.; Branch, T. A., ... Stäbler, M. 2019. Performance evaluation of data-limited, length-based stock assessment methods. *ICES J. of Mar. Sci*, 77(1), 97-108. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz212</u>

Chrysafi, A.; Kuparinen, A. 2016. Assessing abundance of populations with limited data: Lessons learned from data-poor fisheries stock assessment. *Environ. Rev.*, v. 24, n. 1, p. 25–38. https://doi.org/10.1139/er-2015-0044

Clark, W. G. W. 2002. F35% revisited ten years later N. Am. J. Fish Manag. 22: 251–257. https://doi.org/10.1577/1548-8675(2002)022<0251:FRTYL>2.0.CO;2

Cope J (2020) The Stock Synthesis Data-limited Tool (SS-DL tool). https://github.com/shcaba/SS-DL-tool#the-stock-synthesis-data-limited-tool-ss-dl-tool. Accessed November, 06, 2022.

Cope, J. M., Dowling, N. A., Hesp, S. A., Omori, K. L., Bessell-Browne, P., Castello, L., ... & Prince, J. (2023). The stock assessment theory of relativity: deconstructing the term "data-limited" fisheries into components and guiding principles to support the science of fisheries management. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1-23. <u>https://doi.org/10.1007/s11160-022-09748-1</u>

Doray, M.; Reynal, L.; Carpentier, A. 2002. Les pêcheries de poissons pélagiques hauturiers aux Petites Antilles en 2001. Supplement to the Report of the First meeting of the WECAFC Ad-hoc Working Group on the Development of Sustainable Moored Fish Aggregating Device Fishing in the Lesser Antilles, FAO Fish. Rep. 683.

Doray, M., Stéquert, B., & Taquet, M. 2004. Age and growth of blackfin tuna (Thunnus atlanticus) caught under moored fish aggregating devices, around Martinique Island. *Aquatic Living Resources*, 17(1), 13–18. <u>https://doi.org/10.1051/alr:2004009</u>

Dowling, N.A., Smith, A.D.M.; Smith, D.C.; Parma, A.M.; Dichmont, C.M.; Sains-bury, K.; Wilson, J.R.; Dougherty, D.T.; Cope, J.M. 2019. Generic solutions for data-limited fishery assessments are not so simple. *Fish Fish.*, v. 20, n. 1, p. 174–188. <u>https://doi.org/10.1111/faf.12329</u>

Fenton, J., Ellis, J. M.; Falterman, B.; Kerstetter, D. W. 2015. Habitat utilization of blackfin tuna, Thunnus atlanticus, in the north-central Gulf of Mexico. *Environmental Biology of Fishes* 98: 1141–1150. <u>https://doi.org/10.1007/s10641-014-0347-3</u>

Freire, K.; Lessa, R.; Lins-Oliveira, J. E. 2015. Fishery and biology of blackfin tuna *Thunnus atlanticus* off Northeastern Brazil. *Gulf Caribb. Res.* 17: 15-24. https://doi.org/10.18785/gcr.1701.02

Froese, R. 2004. Keep it simple: three indicators to deal with overfishing. *Fish and Fisheries*. 5: 86-91. <u>10.1111/j.1467-2979.2004.00144.x</u>

Garcia, C. I.; Bosh, A. M. 1986. Determinacion de la edad y el crecimiento del bonito, Katsuwonus pelamis y la albacora, *Thunnus atlanticus* en la region nororiental de Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 7 (3): 47-54.

Gutierrez, E. M., Age and growth of blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) in the Gulf of Mexico" (2022). *LSU Master's Theses*. 5536. <u>https://10.31390/gradschool_theses.5536</u>

Hamel, O. S. 2015. A method for calculating a meta-analytical prior for the natural mortality rate using multiple life history correlates. *ICES Journal of Marine Science* 72, 62-69. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu131</u>

Kindong, R.; Gao, C.; Pandong, N. A. M. Q.; Tian, S., Wu, F., Sarr, O. 2020. Stock status assessments of five small pelagic species in the Atlantic and Pacific Oceans using the length-based bayesian estimation (LBB) method. *Front Mar Sci* (7). <u>https://doi.org/10.3389/fmars.2020.592082</u>

ICCAT, 2006. Report for biennial period, 2004-05 PART II (2005) - Vol. 2., Executive Summaries on species: Small Tunas: 128-135.

ICCAT. Access to ICCAT statistical databases. Task I Excel, MS Excel pivot table to obtain nominal catches of Atlantic tunas and tuna-like fish (including sharks), by gear, region and flag, version 03/2015, 5 Mb (rar). 2015.

Jensen, A.L. 1996. Beverton and Holt life history invariants result from optimal trade-off of reproduction and survival. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53: 820-822.

Jensen, A.L. 1997. Origin of the relation between K and L_{∞} and synthesis of relations among life history parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54: 987-989.

Juan-Jordá, M.J.; Mosqueira, I.; Freire, J.; Dulvy, N. K. 2015. Population declines of tuna and relatives depend on their speed of life. *Proc R Soc B Biol Sci*, 282. https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0322

Hilborn, R.; Amoroso, R. O.; Anderson, C. M.; Baum, J. K.; Branch, T. A.; Costello, C.; ... Ye, Y. 2020. Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 2218-2224. <u>https://doi.org/10.1073/pnas.1909726116</u>

Holt, S. J. 1958. The evaluation of fisheries resources by the dynamic analysis of stocks, and notes on the time factors involved. *ICNAF Special Publication*, I: 77–95.

Hordyk, A.; Ono, K.; Sainsbury, K.; Loneragan, N.; Prince, J. 2014. Some explorations of the life history ratios to describe length composition, spawning-per-recruit, and the spawning potential ratio. *ICES Journal of Marine Science*, 72: 204–216 <u>10.1093/icesjms/fst235</u>

Hordyk, A; Ono, K; Valencia, S; Loneragan, N.; Prince, J. 2015. A novel length-based empirical estimation method of spawning potential ratio (SPR), and tests of its performance, for small-scale, data-poor fisheries. *ICES J Mar Sci*, 72:217–231. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu00</u>

Huynh, Q. C.; Beckensteiner, J.; Carleton, L. M.; Marcek, B. J.; Nepal, K. C. V.; Peterson, C. D.; Wood, M. A.; Hoenig, J. M. 2018. Comparative Performance of Three Length-Based Mortality Estimators. *Mar Coast Fish*, 10: 298-313. <u>https://doi.org/10.1002/mcf2.10027</u>

Lee, H.-H., Maunder, M. N., Piner, K. R.; Methot, R. D. 2011. Estimating natural mortality within a fisheries stock assessment model: an evaluation using simulation analysis based on twelve stock assessments. *Fisheries Research*, 109: 89–94. <u>10.1016/j.fishres.2011.01.021</u>

Lotka, A.J. 1907. Relation between birth rates and death rates. Science, v. 26, p. 21–22.

Lucena-Frédou, F.; Kell, L.; Frédou, T.; Gaerrner, D.; Potier, M.; Bach, P.; Travassos, P.; Hazin, F.; Ménard, F. 2017a Vulnerability of teleosts caught by the pelagic tuna longline fleets in South Atlantic and Western Indian Oceans. *Deep Sea Res Part II* 140: 230–241. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.10.008 Lucena-Frédou, F.; Frédou, T.; Ménard, F. 2017b Preliminary ecological risk assessment of small tunas of the Atlantic Ocean. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 73:2663–2678.

Lucena-Frédou, F. ; Mourato, B. ; Frédou, T. *et al.* 2021. Review of the life history, fisheries, and stock assessment for small tunas in the Atlantic Ocean. *Rev Fish Biol Fisheries* 31, 709–736 <u>https://doi.org/10.1007/s11160-021-09666-8</u>

Luckhurst, B. E.; Trott T.; Manuel, S. 2001. Landings, seasonality, catch per unit effort and tagrecapture results of yellowfin tuna and blackfin tuna at Bermuda. *American Fisheries Society Symposium*, 25, 225–234.

Mace, P. M.; Sissenwine, M. P. 1993 How much spawning per recruit is enough? In 'Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management' (Eds Smith SJ, Hunt JJ and Rivard D) *Can Spec Publ Fish Aquat Sci* 120: 101-108.

Mace, P. M. 1994. Relationships between common biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 51 :110-122

Mahon, R.; Mahon, S. Seasonality and migration of pelagic fishes in the eastern Caribbean. FAO expert consultation on shared fishery resources in the Lesser Antilles. Mayaguez, Puerto Rico. 273 pp, 1986.

Narváez, M.; Ariza, L.; Evaristo, E.; Bermudez, R.; Marcano, J.H.; Gutierrez, X; Arocha, F. 2017. Blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) updates on catch, effort and size distribution from Venezuelan fisheries. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 74(1): 82-9.

Nikolic, N. et al. 2020. Connectivity and population structure of albacore tuna across southeast Atlantic and southwest Indian Oceans inferred from multidisciplinary methodology. *Sci. Rep.* 10, 15657.

Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. Journal du Conseil/Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer 39: 175–192.

Pecoraro, C. et al. 2018. The population genomics of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at global geographic scale challenges current stock delineation. *Sci. Rep.* 8, 13890. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32331-3

Pilling, G. G. M.; Kirkwood, G. P.; Walker, S. G. 2002. An improved method for estimating individual growth variability in fish, and the correlation between von Bertalanffy growth parameters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 424–432. https://doi.org/10.1139/f02-022

Pons, M.; Kell, L.; Rudd, M. B.; Cope, J. M.; Lucena-Frédou, F. 2019a. Performance of lengthbased data-limited methods in a multifleet context: application to small tunas, mackerels, and bonitos in the Atlantic Ocean. *ICES J Mar Sci* 76 (4): 960–973. <u>https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz004</u>

Pons, M.; Lucena-Frédou, F.; Frédou, T.; Mourato, B. 2019b Implementation of length-based and catch-based data limited methods for small tunas. SCRS/2019/063.

Saillant, E. A. ; Luque, P. L. ; Short, E. *et al.* 2022. Population structure of blackfin tuna (*Thunnus atlanticus*) in the western Atlantic Ocean inferred from microsatellite loci. *Sci Rep* 12, 9830 https://doi.org/10.1038/s41598-022-13857-z Saxton, B. L. 2009. Historical Demography and Genetic Population Structure of the Blackfin Tuna (*Thunnus atlanticus*) from the Northwest Atlantic Ocean and the Gulf of Mexico. Texas Taylor & Francis.

Sun, M.; Zhang, C.; Chen, Y.; Xu, B; Xue, Y.; Ren, Y. 2018. Assessing the sensitivity of datalimited methods (DLMs) to the estimation of life-history parameters from length–frequency data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 75 (10): 1563-1572. https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0325

Taylor, I. G. et al., 2022. r4ss: R code for Stock Synthesis. R package version 4.2.2. https://github.com/r4ss/r4ss

Then, A.Y.; Honeig, J. M.; Hall, N.G.; Hewitt, D.A. 2015. Evaluating the predictive performance of empirical estimators of natural mortality rate using information on over 200 fish species. *ICES Journal of Marine Science* 72(1): 82-92. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx199

Thorson, J. T. 2019. Predicting recruitment density dependence and intrinsic growth rate for all fishes worldwide using a data-integrated life-history model. *Fish and Fisheries*. https://doi.org/10.1111/faf.12427

Walters, C. J.; Martell, S. J. D. 2004. Fisheries Ecology and Management. Princeton University Press, Princeton, USA.

Zavala-Camin, L. A.; Grassi, R. T. B.; Seckendorff, R. W. V.; Tiago, G. G. 1991. Ocorrência de recursos pesqueiros epipelágicos na posição 22°11'S, 039°55'W, Brasil. *Boletim do Instituto de Pesca 18*, 13–21.

Xiao, Y. 1994. von Bertalanffy growth models with variability in, and correlation between, K and L1. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51: 1585–1590.











Modeled size composition employing LB-SPR (black lines) and SS – DL (red lines) fitted to annual observed data to the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock (Scenario 1: a = M1, b = M2, c = M3; Scenario 2: d = M1, e = M2, f = M3; Scenario 3: g = M1, h = M2, i = M3; Scenario 4: j = M1, k = M2, l = M3; Scenario 5: m = M1, n = M2, o = M3; M1 = 0.96, M2 = 0.66, and M3 = 0.35).

Supplementary material 2



M/K distribution of parameters found in literature for blackfin tuna *Thunnus atlanticus*.

Supplementary material 3

i	N // 17		SL	.50			SL	.95			F/I	M	
Scenarios	M/K	1998	1999	2013	2019	1998	1999	2013	2019	1998	1999	2013	2019
	M/K1	64	63.37	63.29	62.96	75.72	74.81	74.53	74.39	0.69	0.71	0.8	0.8
Scenario 1	M/K2	63.27	62.59	62.62	62.33	76.16	75.09	74.92	74.85	1.35	1.38	1.52	1.53
	M/K3	62.86	62.19	62.28	61.98	77.61	76.4	76.24	76.18	3.32	3.38	3.67	3.68
	M/K1	60.81	60.46	60.87	60.79	74.24	73.44	73.7	73.94	0.88	0.96	1.15	1.21
Scenario 2	M/K2	60.04	59.74	60.27	60.23	74.61	73.73	74.1	74.4	1.6	1.74	2.02	2.11
	M/K3	59.53	59.3	59.92	59.89	75.84	74.84	75.24	75.56	3.86	4.12	4.68	4.86
			-	-	-								
	M/K1	64.39	63.63	63.51	63.17	76.9	75.77	75.44	75.28	1.54	1.52	1.63	1.62
Scenario 3	M/K2	64.22	63.44	63.35	63	77.96	76.72	76.38	76.23	2.66	2.64	2.81	2.79
	M/K3	64.02	63.22	63.17	62.82	79.32	77.94	77.59	77.45	5.84	5.81	6.15	6.12
	M/K1	65.89	64.87	64.57	64.13	78.1	76.88	76.36	76.1	2.74	2.63	2.69	2.63
Scenario 4	M/K2	65.64	64.7	64.43	64	79.43	78.05	77.47	77.21	4.6	4.4	4.48	4.39
	M/K3	65.46	64.6	64.34	63.93	81.09	79.51	78.86	78.59	9.88	9.43	9.56	9.38
	M/K1	65.54	64.59	64.34	63.92	80.22	78.74	78.17	77.93	6.44	6.19	6.33	6.22
Scenario 5	M/K2	65.61	64.62	64.37	63.94	80.97	79.41	78.8	78.56	9.62	9.25	9.45	9.3
	M/K3	65.67	64.65	64.4	63.97	81.78	80.12	79.49	79.24	17.37	16.71	17.05	16.8

SL50, SL95 and F/M values to each natural mortality (M) and by year outputted by LBSPR for the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock (M/K1, M = 1.02; M/K2, M = 0.72; M/K3, M = 0.42).
Supplementary material 4





Virginal length composition (salmon) and observed length composition (blue) estimated by LBSPR in 2019 for the SWA blackfin *Thunnus atlanticus* stock (Scenario 1: a = M1, b = M2, c = M3; Scenario 2: d = M1, e = M2, f = M3; Scenario 3: g = M1, h = M2, i = M3; Scenario 4: j = M1, k = M2, l = M3; Scenario 5: m = M1, n = M2, o = M3; M1 = 0.96, M2 = 0.66, and M3 = 0.35).