

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM RECURSOS PESQUEIROS E AQUICULTURA**

**ECOLOGIA TRÓFICA, USO DO HABITAT E MIGRAÇÃO DA ALBACORA  
LAJE (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) NO ATLÂNTICO OESTE  
TROPICAL**

**Karla Mirella de Assis Bezerra Martins**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura da Universidade Federal Rural de Pernambuco como exigência para obtenção do título de Doutor.

**Prof. Dr. Paulo Travassos**  
Orientador

**Recife**

**Fevereiro, 2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

M379e Martins, Karla Mirella de Assis Bezerra.

Ecologia trófica, uso do habitat e migração da *ALBACORA LAJE (Thunnus albacares Bonnaterre, 1788) no Alântico oeste tropical* / Karla Mirella de Assis Bezerra Martins. – Recife, 2025.

84 f.; il.

Orientador(a): Paulo Travassos.

Co-orientador(a): Yuri Niella.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e anexo(s).

1. Trofodinâmica. 2. Isótopos estáveis. 3. Telemetria. 4. Parques e reservas marinhos I. Travassos, Paulo, orient. II. Niella, Yuri, coorient. III. Título

CDD 639.3

## **Dedicatória**

Aos meus ancestrais que abriram caminhos para que aqui eu chegasse.  
A todas as meninas/mulheres negras, que sejam continuidade para os nossos.  
A natureza por todas as experiências vividas.

O mundo é uma passagem, conquiste tudo que tiver coragem!

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Paulo Travassos pela orientação, confiança e incentivo durante a construção de uma jornada importante da minha vida desde o mestrado. Agradeço por todo conhecimento compartilhado. Me sinto honrada em tê-lo como mentor nestes oito anos. Ao Dr. Yuri Niella pela coorientação, colaboração e disponibilidade com as demandas do projeto mesmo com um fuso horário de 12 horas no caminho. Aos membros da banca examinadora por aceitarem avaliar e contribuir no aprimoramento deste manuscrito.

Ao Lab. de Ecologia Marinha e ao Projeto PROTUNA pela oportunidade de trabalho durante a pós-graduação e viabilidade financeira da pesquisa. Ao Projeto ABRAÇOS e ao Lab. de Etologia de Peixes pela colaboração com parte dos dados isotópicos publicados no primeiro artigo desta tese. Ao prof. Luís Otávio e a secretária Ana Clara pela grande ajuda prestada durante todas as etapas e fases junto ao Departamento de Pesca e Aquicultura.

À CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e ao PMPA pela bolsa de trabalho junto ao projeto oportunizando meu desenvolvimento profissional no que concerne ao Monitoramento da Pesca de Atuns no Brasil. Aos pescadores do Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo e Fernando de Noronha pelo apoio operacional durante o trabalho a bordo, contribuindo durante os cruzeiros de pesca para coleta de material e marcação eletrônica dos atuns.

Aos companheiros de departamento: Tatiana, Mari Rêgo, Anne, Catarina, M<sup>a</sup> Lúcia, Lucas (Nunes e Santos), Ananda, Poliana, Vitória, Robert, Fernanda e Geremias pelo companheirismo e todo apoio carinhoso prestado (em especial nos momentos de angústia) durante estes anos de convivência.

A minha família Lúcia, Antonio e Júnior pelo apoio incondicional e por serem minha fortaleza e inspiração mesmo estando longe fisicamente. À Bruno que sonha, luta e conquista cada um dos nossos sonhos/objetivos lado a lado. E aos meus pais Wanderson e Josafá por todo zelo. Amo vocês!

A Deus e ao meu Sagrado pelo amor, cuidado, amparo e força em todos os momentos deste ciclo.

A todos, muito obrigada mesmo! AXÉ.

## Resumo

O objetivo principal da tese consistiu em agregar informações ao conhecimento sobre a albacora laje, *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) principalmente no que se refere ao seu comportamento trofodinâmico e uso do habitat oceânico. Embora seja uma das principais espécies de atuns capturadas no Atlântico tropical, informações acerca destes aspectos ecológicos em especial no entorno de ambientes insulares como Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e Fernando de Noronha (AFN), necessitam de detalhamento. A tese é apresentada em formato de capítulos compostos por artigos científicos. No primeiro capítulo-artigo utilizamos dados de isótopos estáveis para (i) identificar possíveis diferenças na composição da dieta desta espécie entre os arquipélagos de AFN e ASPSP e (ii) investigar potenciais diferenças na dieta por tamanho entre essas duas áreas insulares. Em geral observamos diferentes contribuições entre as presas nas duas áreas de estudo, e mudanças significativas na dieta da espécie de acordo com o aumento de tamanho do predador. No segundo capítulo-artigo utilizamos marcas via satélite (*pop-up satellite archival tags*) para investigar os deslocamentos circadianos e uso do habitat oceânico do sudoeste atlântico pela albacora laje. Em geral observamos que os indivíduos no ASPSP exibiram maior dispersão, enquanto aqueles em FN e no RJ (Rio de Janeiro – Cabo Frio) demonstraram maior fidelidade ao habitat. A movimentação vertical indicou um padrão diurno de permanência em águas superficiais e mergulhos noturnos mais profundos (>200 m) ampliando as informações sobre as capacidades fisiológicas da albacora laje nestas áreas. No terceiro capítulo-nota científica, realizamos um experimento empregando telemetria acústica com o intuito de observar o comportamento da albacora laje em relação ao uso do habitat oceânico do ASPSP. Durante o experimento 35% dos indivíduos marcados permaneceram nos arredores do arquipélago, em particular na camada mais superficial do oceano. A integração dos resultados dos capítulos-artigos proporcionou o acesso a informações que sugerem que áreas marinhas protegidas e ambientes de elevada produtividade desempenham um papel crucial na dinâmica oceânica, tanto sobre as relações tróficas quanto na dinâmica espaço-temporal, fornecendo importantes e diferentes áreas para o desenvolvimento da albacora laje. Estes conhecimentos trazem luz a novas informações acerca da bioecologia da albacora laje, em especial na porção sudoeste do Oceano Atlântico. As informações aqui descritas podem embasar novos estudos que incluam e levem em consideração um monitoramento de longo prazo, efeitos das mudanças climáticas e interações tróficas em diferentes escalas. Destacamos a importância de integrar diferentes ferramentas metodológicas para aprimorar a compreensão da ecologia de espécies marinhas de alto valor econômico e ecológico; uma vez que o uso combinado de ferramentas pode auxiliar em abordagens ecossistêmicas para a gestão dos recursos pesqueiros, assegurando a sustentabilidade das populações de atuns e a manutenção dos serviços ecossistêmicos para o equilíbrio dos oceanos.

**Palavras-chave:** Trofodinâmica, Isótopos Estáveis, Telemetria Acústica e Satélite, Comportamento, Áreas Marinhas Protegidas.

## Abstract

The aim of this research/thesis was to add information to the knowledge about the yellowfin tuna, *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788), mainly regarding its trophodynamic behaviour and oceanic habitat use. Although it is one of the main tuna species caught in the tropical Atlantic, information about ecological aspects, especially in the vicinity of insular environments such as the São Pedro and São Paulo Archipelago (ASPSP) and Fernando de Noronha (AFN), requires further detailing. The thesis is presented in the format of chapters composed of scientific articles. In the first chapter-article, we used stable isotope data to (i) identify possible differences in the diet composition of this species between the AFN and ASPSP archipelagos and (ii) investigate potential differences in diet by size between these two insular areas. In general, we observed different contributions between the prey in the two study areas, and significant changes in the diet of the species according to the increase in predator size. In the second chapter-article, we used satellite tags (*pop-up satellite archival tags*) to investigate circadian movements and habitat use by the Atlantic Ocean by the yellowfin tuna. In general, we observed that individuals in the ASPSP exhibited greater dispersion, while those in FN and RJ (Rio de Janeiro – Cabo Frio) demonstrated some habitat fidelity. The vertical movement indicated a daily pattern of permanence in surface waters and deeper night dives (>200 m), expanding the information on the physiological capabilities of the yellowfin tuna in these areas. In the third chapter-scientific note, we conducted an experiment using acoustic telemetry to observe the behaviour of the yellowfin tuna in relation to the use of the oceanic habitat of the ASPSP. During the experiment, 35% of the tagged individuals remained in the surroundings of the archipelago, particularly in the most superficial layer of the ocean. The integration of the results of the chapters-articles provided access to information suggesting that marine protected areas and high productivity environments play a crucial role in ocean dynamics, both in trophic relationships and in spatiotemporal dynamics, providing important and different areas for the development of the yellowfin tuna. This knowledge brings new information about the bioecology of the yellowfin tuna, especially in the southwestern portion of the Atlantic Ocean. The information described here can support new studies that include and take into account long-term monitoring, the effects of climate change and trophic interactions at different scales. We highlight the importance of integrating different methodological tools to improve understanding of the ecology of marine species of high economic and ecological value; since the combined use of tools can assist in ecosystem approaches for the management of fisheries resources, ensuring the sustainability of tuna populations and the maintenance of ecosystem services for the balance of the oceans.

**Key words:** Trophodynamics, Stable Isotopes, Acoustic and Satellite Telemetry, Behaviour, Marine Protected Areas.

## Lista de figuras

	Página
<b>Figura 1-</b> Exemplar de albacora laje ( <i>Thunnus albacares</i> - YFT)	16
<b>Figure 1-</b> Location of the study sites in the western Atlantic Ocean (A) and the areas in detail on the right side of the map: Saint Peter and Saint Paul (B) and Fernando de Noronha (C) Archipelagos.	28
<b>Figure 2-</b> Isoscape biplots of prey sources (Zooplankton, Cephalopods, flying fish and Fish larvae) and 65 yellowfin tuna (points coloured by study area) tracer data	32
<b>Figure 3-</b> Density distributions of modelled diet contributions from four prey sources on the diet of yellowfin tuna in (A) Fernando de Noronha (FNA) and (B) Saint Peter and Saint Paul archipelago (SPSPA).	32
<b>Figure 4-</b> Generalised Additive Models (GAM) of prey source contribution to yellowfin tuna diet concerning total length. Shaded areas and horizontal lines represent the 95% confidence intervals and null effects, respectively. The dotted red line marks the size of the first sexual maturity for the species ( $L_{50} = 99.2$ cm; Diaha et al., 2016).	33
<b>Figure S1.</b> Distribution of sampled yellowfin tuna sizes per study area (Fernando de Noronha archipelago = FNA; Saint Peter and Saint Paul archipelago = SPSPA). The vertical dashed lines represent fish size used to include only the individuals ranging between 60 and 125 cm total length (TL).	36
<b>Figura 1:</b> Localização das três áreas de estudo usadas para marcação da albacora laje no Oceano Atlântico Sul. Os pontos vermelhos representam cada uma dessas áreas: SPSP (Arquipélago de São Pedro e São Paulo), FNA (Arquipélago Fernando de Noronha) e RJ (região de Cabo Frio).	49
<b>Figure 2:</b> Análise de Kernel dos exemplares de albacora laje marcados com telemetria satélite (miniPAT) mostrando com 95% de confiança as distribuições dos peixes nas áreas de estudo: ASPSP em roxo, AFN em azul e RJ em verde.	50
<b>Figure 3:</b> (A) Frequência da distância diária percorrida; (B) Frequência da distância total percorrida a partir do local de marcação.	54
<b>Figure 4:</b> Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas no ASPSP. As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura	54
<b>Figure 5:</b> Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas no AFN. As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura	56
<b>Figure 6:</b> Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas em Cabo Frio (RJ). As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura.	57
<b>Figure 7:</b> Padrões de uso do habitat vertical da albacora laje ( <i>Thunnus albacares</i> ) nas três regiões de estudo: Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) e região de Cabo Frio (RJ), diferenciados entre períodos diurno (Day) e noturno (Night). BoxPlot apresentando a distribuição dos dados para cada variável, com a mediana representada pela linha dentro da caixa, os quartis superior e inferior delimitando a caixa, e os valores extremos plotados como pontos individuais.	58
<b>Figure 1:</b> Sequential diagram of the tagging procedure in the yellowfin tuna specimens at ASPSP: A) incision in the peritoneal cavity made with a scalpel, B) insertion of the acoustic transmitter, C) external plastic tag inserted into the second dorsal fin, D) tuna release into the ocean.	71
<b>Figure 2:</b> (A) Abacus graph showing the days of detection of juvenile yellowfin tuna ( <i>Thunnus albacares</i> - YFT) tagged between 04/17/2022 and 04/25/2022 at SPSPA; Distribution of frequencies of (B) time of day and (C) depths most used by juvenile yellowfin tuna tagged at the same time period described above	73

## Lista de tabelas

### Página

<b>Table 1-</b> Stable isotopes mean and standard deviation (SD) values (‰) for sampled individuals of yellowfin tuna by study area (Area), including the total length (TL; cm) ranges and the number of individuals samples (N).	31
<b>Table 2-</b> Stable isotope values for prey sources sampled in Fernando de Noronha and Saint Peter and Saint Paul Archipelago, including mean and standard deviation (sd) values for the two, analysed samples. The mean (sd) percentages of modelled diet contribution per source are also included, with the main contributors highlighted in bold	33
<b>Table 3-</b> Prey source contributions concerning yellowfin tuna size for each region were assessed with a Generalised Additive Models (GAM). Included are the respective coefficient estimates (Est), reference degrees of freedom (Ref.df), F-value (F), p-value ( <i>p</i> ) and percentages of deviance explained (Dev) from each model	33
<b>Tabela 1:</b> Informações gerais sobre a marcação eletrônica da albacora laje no Oceano Atlântico Sul	52
<b>Tabela 2:</b> Sumário do teste de Tukey	
<b>Tabela 3:</b> Resultados da análise de variância (ANOVA) ao comparar as variáveis ambientais entre as três áreas de estudo (ASPSP, AFN e RJ). A tabela apresenta os graus de liberdade (Df), o valor da estatística F, e o valor de significância estatística (p-value)	55
<b>Tabela 1 – Anexo:</b> Sumário do experimento de telemetria acústica no ASPSP em abril/2022 com sequência de atuns marcados, data e horário das marcações e o comprimento total dos peixes em centímetros	59
	84

## Sumário

	Página
<b>Resumo</b>	05
<b>Abstract</b>	06
<b>Lista de figuras</b>	07
<b>Lista de tabelas</b>	08
<b>1- Introdução Geral</b>	10
1.1 Contexto da tese	11
1.2 A importância global dos atuns	13
1.3 A pesca de atuns no Brasil	14
1.4 Espécie estudada	15
1.5 Justificativa	17
<b>2- Capítulo I: Marcadores Naturais - Dinâmica Trófica</b>	
Artigo 1: Feeding behaviour of yellowfin tuna around two insular regions of the western Atlantic Ocean	25
<b>3- Capítulo II: Marcadores Artificiais - Dinâmica Espaço-Temporal</b>	
Artigo 2: Movements and habitat use of yellowfin tuna in the Southwest Atlantic with electronic pop-up satellite archival tags	46
<b>4- Capítulo III: Marcadores Artificiais - Dinâmica Espaço-Temporal</b>	
Artigo 3 – Nota Científica: Exploring the behaviour of yellowfin tuna in the São Pedro and São Paulo Archipelago: an experiment using acoustic telemetry	68
<b>4- Considerações finais</b>	80
<b>5- Referências</b>	83
<b>Anexos</b>	83

## INTRODUÇÃO GERAL

---



Pesca oceânica no Arquipélago de Fernando de Noronha. Foto: Karla Martins.

## 1.1 Contexto da tese

Predadores marinhos têm sido impactados globalmente devido a diferentes efeitos antropogênicos, como mudanças climáticas, pressão pesqueira e perda de habitats (Boyse et al., 2023). Tais mudanças afetam especialmente espécies migratórias, que ficam expostas a uma variedade de ameaças à medida que transitam pelas jurisdições de vários países e pelo oceano aberto (Harrison et al., 2018). A amplitude do impacto dessas alterações depende da movimentação dos organismos, de suas preferências de habitat e de condições bioecológicas (Rohner et al., 2023). Os animais se deslocam para obter alimento, evitar predação e também para reprodução (Hussey et al., 2015). Compreender como e onde diferentes recursos pesqueiros vivem, bem como seus padrões de movimentação e uso dos habitats, permite avanços na sustentabilidade dos estoques pesqueiros (Weng et al., 2009).

Observar como os organismos se comportam ao longo de seu ciclo de vida, em relação à trofodinâmica e aos movimentos migratórios, possibilita acompanhar e inferir como esses animais podem responder às alterações do ecossistema (Rangel et al., 2022). O conhecimento sobre o uso do habitat oceânico por grandes predadores pelágicos que realizam movimentações em larga escala sempre apresentou dificuldades de observação in situ. Contudo, o desenvolvimento de marcadores (naturais e artificiais) tem ampliado as capacidades de investigação na ciência pesqueira (Hussey et al., 2015). Marcadores naturais (como isótopos estáveis) e artificiais (marcas plásticas e via satélite) têm sido aplicados com sucesso em estudos sobre comportamento trófico e migratório de diversas espécies (Hobson, 1999; Logan et al., 2020; Martins et al., 2021; Block et al., 1998; Crossin et al., 2017; Filous et al., 2022, Leroy et al., 2015). O uso dessas ferramentas, especialmente em peixes pelágicos como atuns, é atraente para a análise de características tróficas associadas aos movimentos migratórios, fornecendo informações sobre padrões, processos e mecanismos em diferentes escalas espaço-temporais (Block et al., 2011; Hays et al., 2016).

A distribuição espaço-temporal e as interações ecológicas desempenhadas pelos atuns são aspectos primordiais para assegurar a estabilidade das populações e a exploração racional dos recursos (Vaihola et al., 2023). Além disso, entender os padrões migratórios e a ocupação do habitat garante maior eficácia na implementação de planos de gestão e conservação (Queiroz et al., 2016). O acesso a essas informações possibilita

a identificação de habitats essenciais usados para diferentes finalidades e estágios de vida. Quando agregadas a outras características biológicas, essas informações permitem avanços no conhecimento ecológico das espécies e de suas interações com a atividade pesqueira (Costello et al., 2015, Leroy et al., 2015). Apesar de relevantes componentes do ambiente marinho, estudos sobre padrões de movimentação em diferentes escalas associados à trofodinâmica, especialmente no entorno de ecossistemas insulares, ainda são escassos.

O entendimento de como e porque espécies migratórias utilizam e se movem no tempo-espaço é fundamental para determinar a forma como os estoques são geridos (Logan et al., 2020). Algumas ferramentas vêm sendo utilizadas para investigar aspectos biológicos e comportamentais dos estoques de atuns em todo o mundo, o que inclui diferentes tipos de marcadores, como os artificiais por meio de marcas convencionais e eletrônicas (Block et al., 1998; Schaefer et al., 1961; Ortiz, 2017) e naturais como os isótopos estáveis (Graham et al., 2010; Hoolihan et al., 2014). Os isótopos estáveis, em especial o carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) e o nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ) permitem importantes reflexões sobre a dinâmica trófica e estrutura da comunidade em teias alimentares aquáticas (Pereira e Benedito, 2007). Além disso, funcionam como importante abordagem complementar na compreensão dos movimentos migratórios, padrões de residência dos atuns, uso do habitat e a ecologia trófica associada a estes movimentos (Madigan et al., 2012, Tawa et al., 2017).

Já os marcadores artificiais, utilizados nos programas de marcação e recaptura (ex.: Programa de Marcação de Atuns Tropicais no Oceano Atlântico – AOTTP/ICCAT) empregando marcas convencionais (plásticas) foram globalmente realizados, ajudando a descrever a distribuição e as movimentações transatlânticas de diferentes espécies de atuns. Além disso, permitiram a obtenção de informações diretas sobre taxas de crescimento e estimativas de mortalidade, importantes para estatísticas populacionais (Schaefer et al., 1961). Marcadores de rastreamento eletrônico do tipo PSAT (Pop-up satellite archival tags) registram dados importantes enquanto estão acoplados aos animais, desprendendo-se em determinado momento e transmitindo os dados via satélite Argos (Block et al., 1998). PSAT'S compilam dados de profundidade (pressão), temperatura e níveis de luminosidade por períodos programados, fundamentais para entendimento dos padrões de movimentação vertical e horizontal, rotas migratórias,

possíveis áreas de desova e alimentação e preferências termobatimétricas (Schaefer et al., 2007; Lin et al., 2021, Wright et al., 2021).

Durante o seu desenvolvimento, os atuns passam por mudanças nos processos biológicos alimentares, reprodutivos e migratórios (Collete e Nauen., 1983). Elevada taxa metabólica, diferentes estratégias alimentares e condições fisiológicas peculiares, permitem que os atuns explorem o oceano em extensas migrações (Block et al., 2001). Dentre as particularidades do grupo, destaca-se a presença de um complexo de artérias que utiliza o fluxo sanguíneo contracorrente para trocar calor mantendo um gradiente em relação a temperatura (Block et al., 2001). Além de crescimento rápido e diferentes estratégias tróficas que resultam de uma longa história evolutiva dentro dos últimos 2 milhões de anos (Graham e Dickson, 2001; Ramirez, 2015). Exibem destaque funcional na dinâmica do ambiente marinho, seja por meio das interações tróficas ou na ciclagem de nutrientes (Schmitz et al., 2010). Ecossistemas insulares podem influenciar a condição energética dos predadores e suas rotas migratórias (Filous et al. 2022; Wright et al., 2021). Estudos em escala regional são fundamentais para aprimorar a compreensão acerca do papel funcional destes locais nos processos ecológicos dos atuns.

## **1.2 A importância global dos atuns**

Atuns (Scombridae, Perciformes) são recursos naturais compartilhados que demandam esforços de cooperação internacional para sua proteção (Hilborn e Sibert, 1988). Apresentam adaptações fisiológicas excepcionais, que lhes permitem ocupar ampla gama de ambientes oceânicos, sendo extensamente distribuídos nos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico (Collete e Nauen., 1983). A capacidade de termorregulação possibilita a realização de extensos deslocamentos, descritos através da recaptura de exemplares a quilômetros de distância do local de marcação (Block et al., 2001). Esta natureza migratória, oportuniza viagens por múltiplas zonas econômicas exclusivas e águas internacionais, tornando complexa a gestão das pescarias atuneiras.

Para lidar com esse desafio, atuns e espécies afins no Oceano Atlântico são geridas pela Comissão Internacional para Conservação do Atum no Atlântico (ICCAT). A ICCAT foi estabelecida como organização intergovernamental com autoridade científica e gerenciamento para coordenar o manejo e a conservação das espécies de atuns no oceano Atlântico e mares adjacentes (Safina, 2001). Por meio do Comitê Científico de Pesquisa

e Estatística (SCRS – *Standing Committee on Research and Statistics*) a ICCAT realiza as avaliações dos estoques. Os resultados oriundos destas avaliações dão suporte ao parecer científico para gestão e manejo viabilizado pelo comitê, como o estabelecimento dos limites sustentáveis de captura das espécies exploradas (quotas de captura) (Hazin e Travassos, 2007). A partir disso, a Comissão delibera a repartição da captura máxima permita (TAC – *Total Allowable Catch*) entre os vários países membros (Hazin e Travassos, 2007). Espécies comercialmente importantes são analisadas em períodos específicos, por meio de avaliações de estoque que visam a sustentabilidade das populações e pescarias atuais e futuras.

Além de constituir elo essencial na saúde dos ecossistemas marinhos como predadores de topo, atuns desempenham um papel vital na economia global (FAO, 2022). Movimentam o setor pesqueiro, promovendo fonte de alimento, emprego e renda para distintas comunidades e nações (Artetxe-Arrate et al., 2021). A procura por atuns no mercado tem aumentado na última década, com uma captura global de aproximadamente 8,3 milhões de toneladas em 2022 (FAO, 2024). A albacora laje figurou entre as dez principais espécies com capturas próximas aos seus níveis mais altos registrados em 2022, cerca de 2,3 mil toneladas (FAO, 2024). A alta demanda tem impulsionado o crescimento da pesca industrial de atuns, que é dominada por grandes frotas pesqueiras de países como Japão, Espanha, e Estados Unidos.

### **1.3 A pesca de atuns no Brasil**

No Brasil, a pesca de atuns é uma atividade de grande relevância, contribuindo significativamente para a economia pesqueira do país. A albacora laje - *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) é uma das espécies de atuns tropicais capturadas pelas frotas industrial e artesanal, especialmente na região Nordeste (Hazin, 2005). A pesca industrial é realizada principalmente por embarcações de grande porte com maior poder de pesca, utilizando em geral o espinhel e a rede de cerco, enquanto a pesca artesanal opera com mais proximidade da costa, empregando linha de mão e vara e isca viva (Andrade et al., 2020). Em 2022, cerca de 60 mil toneladas de atuns e espécies afins foram capturadas no Oceano Atlântico pelas frotas de bandeira brasileira (ICCAT, 2024). Os atuns tropicais albacoras bandolim (*Thunnus obesus*), branca (*Thunnus alalunga*) e laje (*Thunnus albacares*) são recursos alvo dessas pescarias, assim como espécies afins como dourado (*Coryphaena hippurus*), cavala (*Acanthocybium solandri*) algumas espécies de

peixes de bico e tubarões (Hazin e Travassos, 2007, ICCAT, 2024). Das espécies mencionadas, atualmente apenas a albacora bandolim encontra-se próxima ao seu limite de rendimento máximo sustentável, sendo assim submetida a regras de monitoramento e controle de captura (MPA/MMA nº12, 2024).

No cenário da pesca oceânica, o Brasil está estrategicamente próximo das rotas migratórias de diferentes espécies de atum no Atlântico Sul (Hazin e Travassos, 2007). O país é membro da ICCAT desde a fundação desta comissão no Rio de Janeiro em 1996 e participa ativamente das reuniões da ICCAT, contribuindo para a formulação de estratégias de conservação e manejo para as populações de atuns no Atlântico (Hazin e Travassos, 2007). A gestão pesqueira de atuns no Brasil é conduzida por meio de instrumentos legais e regulamentares. O principal órgão responsável pela gestão é o Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA), que através do Comitê Permanente de Gestão da Pesca e do Uso Sustentável dos Atuns e Afins (CPG Atuns e Afins) desenvolve e implementa políticas de manejo com base em dados científicos e nas diretrizes estabelecidas pela ICCAT (Portaria SAP/MAPA Nº 554, 2022). Alguns dos instrumentos utilizados são planos de manejo específicos para as espécies de atuns, que incluem medidas como quotas de captura, regulamentação de tamanhos mínimos e monitoramento das capturas através de sistemas de registro e observação a bordo (Portaria SAP/MAPA Nº 554, 2022).

Além disso, o Brasil tem investido em programas de pesquisa e monitoramento para melhorar a coleta de dados sobre os estoques de atuns, essenciais para a gestão eficaz das pescarias (PROTUNA, 2018; PMPA, 2024). O monitoramento contínuo das capturas e o cumprimento das normas internacionais são fundamentais para assegurar a sustentabilidade das pescarias de atuns no Brasil, evitando o colapso dos estoques e garantindo o desenvolvimento econômico do setor pesqueiro no país.

#### **1.4 Espécie estudada**

##### *Aspectos biológicos*

O *Thunnus albacares*, comumente conhecido como albacora laje ou yellowfin tuna (YFT – nome em inglês e sua nomenclatura abreviada utilizada pela ICCAT) pertence à família Scombridae, a qual possui 15 gêneros e cerca de 50 espécies de peixes marinhos epipelágicos (Collete et al., 2001). O gênero *Thunnus* considerado o mais

especializado contém oito espécies, é dividido em dois subgêneros, baseado nas diferentes adaptações a endotermia: atuns de águas frias e atuns tropicais (Collete et al., 2001). Os atuns tropicais grupo que inclui a albacora laje, detêm um sistema trocador de calor contracorrente (*retia mirabilia*) que permite a conservação do calor nos músculos, trocas gasosas e de nutrientes (Block et al., 2001). A espécie apresenta um formato corporal fusiforme e hidrodinâmico que aprimora seus movimentos e performance de natação, e os indivíduos adultos tem a segunda nadadeira dorsal com maior comprimento (Fig. 1) (Pecoraro et al., 2017).



Figura 1: Exemplar de albacora laje (*Thunnus albacares* - YFT). Imagem concedida: PROTUNA (Projeto de Apoio Técnico Científico ao Desenvolvimento da Pesca de Atuns e Afins no Brasil).

A espécie apresenta ampla distribuição em águas tropicais e subtropicais dos Oceanos Atlântico, Índico e Pacífico (Collete e Nauen, 1983), habitando a região epipelágica, normalmente encontrada em águas mais quentes com temperatura entre 18° e 31° (Sund et al., 1981). Apresenta preferência por profundidades inferiores a 100m, muito embora realize mergulhos em águas mais profundas (Brill et al., 1999). Na fase adulta, exibe as nadadeiras dorsal e anal alongadas, de cor amarelada, o que configura seu nome pelo qual é internacionalmente conhecida (yellowfin tuna - YFT) (Figura 1).

As medidas máximas já registradas foram de 239 cm de comprimento zoológico e 200 kg de peso total, e tamanho médio de captura variando entre 35 e 180 cm (Anon, 1994). Quanto a longevidade, a estimativa para a espécie é de 8 anos (Froese e Pauly, 2006, ICCAT, 2010) e as taxas de crescimento variam entre as fases, sendo mais lento quando jovens (entre 40 e 75 cm de comprimento furcal) e mais rápida na fase adulta.

Com relação a reprodução, apresenta diferentes tamanhos de primeira maturidade ( $L_{50}$ ) que variam entre os oceanos e de acordo com as variações ambientais relevantes. Para o oceano Atlântico, considera-se o  $L_{50}$  de 99.2 (Diaha et al., 2015). Apresenta um ciclo reprodutivo que é amplamente influenciado pela temperatura da água, com desova ocorrendo principalmente em águas tropicais e subtropicais (Pecoraro et al., 2017). As fêmeas desovam milhares de ovos por temporada, com picos de reprodução que variam conforme a região (Schaefer, 1998). As áreas de desova são geralmente localizadas em regiões onde as correntes oceânicas proporcionam condições ideais para a sobrevivência das larvas, o que é crucial para a manutenção das populações.

A espécie ocupa a posição de predador de topo, alimentando-se de uma variedade de peixes, cefalópodes e crustáceos (Olson et al., 2016; Le-Alvarado et al., 2021; Vaske-Jr et al., 2003). A dieta varia conforme a disponibilidade de presas, o que reflete sua adaptabilidade a diferentes ambientes marinhos. Estudos sobre os hábitos alimentares da albacora-laje, utilizando isótopos estáveis, tem revelado padrões de nicho trófico complexos que variam entre estágios de vida e as áreas geográficas (Graham et al., 2007; Madigan et al., 2014).

## 1.5 Justificativa

A albacora laje é propriedade deste estudo por: I) ser um recurso pesqueiro de natureza altamente migratória com o mesmo estoque sendo explorado por diversos países, II) alto valor comercial sendo importante fonte de divisas para o Brasil, III) conhecimentos ainda limitados sobre suas características tróficas e migratórias no Oceano Atlântico Sul. Aspectos sobre a ecologia trófica, movimentos migratórios e as preferências de habitat permitem estimativas de abundância da população, observações acerca da vulnerabilidade da espécie e possíveis respostas frente as alterações do ecossistema oceânico.

Esta tese visa contribuir com as necessidades de informações científicas da representação brasileira junto a entidade internacional de gestão de pesca de atuns e afins, em particular a Comissão Internacional para Conservação do Atum no Atlântico (ICCAT). O presente estudo também é resultado do projeto intitulado “Projeto de Apoio Técnico Científico ao Desenvolvimento da Pesca de Atuns e Afins no Brasil (PROTUNA)” coordenado pelo Laboratório de Ecologia Marinha (LEMAR - UFRPE), em parceria com

a ICCAT. Espera-se através desta pesquisa, reduzir algumas incertezas sobre a bioecologia da albacora laje, principalmente no que se refere ao seu comportamento trófico, deslocamentos circadianos e habitat preferencial no Oceano Atlântico.

Neste universo, surgiram as questões que foram objetos de estudo desta tese, divididas em três capítulos que tiveram como propósito: descrever aspectos do comportamento trófico da albacora laje no entorno do Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) e São Pedro e São Paulo (ASPSP) utilizando isótopos estáveis (**Cap. I**), traçar os padrões de movimentação e habitat preferencial da espécie empregando dispositivos por satélite no entorno do AFN, ASPSP e Cabo Frio (RJ) (**Cap. II**), e realizar um experimento com telemetria acústica para observar como a albacora laje utiliza o habitat oceânico do ASPSP (**Cap. III**).

Capítulo I: Investigamos a trofodinâmica espacial e mudanças na dieta da albacora laje no entorno de duas áreas marinhas protegidas aplicando isótopos estáveis do predador e de quatro diferentes tipos de presas alimentares (**Feeding behaviour of yellowfin tuna around two insular regions on the western Atlantic Ocean**).

Capítulo II: Analisamos os deslocamentos circadianos, uso do habitat oceânico e perfis de mergulho da albacora laje em três diferentes áreas de estudo (ASPSP, AFN e RJ) através da marcação eletrônica via satélite (**Movements and habitat use of yellowfin tuna in the Southwest Atlantic with electronic pop-up satellite archival tags**).

Capítulo III: Descrevemos nível de interação entre a albacora laje e o habitat oceânico do arquipélago de São Pedro e São Paulo, durante um experimento utilizando telemetria acústica (**Experimento com telemetria acústica no Arquipélago em São Pedro e São Paulo**).

## Referências Bibliográficas

- Artetxe-Arrate, I., Fraile, I., Marsac, F., Farley, J. H., Rodriguez-Ezpeleta, N., Davies, C. R., Murua, H. (2021). A review of the fisheries, life history and stock structure of tropical tuna (skipjack *Katsuwonus pelamis*, yellowfin *Thunnus albacares* and bigeye *Thunnus obesus*) in the Indian Ocean. *Advances in Marine Biology*, 88, 39-89
- ANON, (1994). Atlas pesquero de México. SEPESCA. Instituto Nacional de la Pesca, 234 pp.
- Boyse, E., Goodman, S. J., Beger, M. (2023). Marine predator spatial conservation priorities are taxon-specific. *bioRxiv*, 2023-03
- Block, B. A., Dewar, H., Farwell, C., Prince, E. D. (1998). A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95 (16), 9384-9389
- Block, B. A., Stevens, E. D. (Eds.). (2001). Tuna: physiology, ecology, and evolution (Livro, Vol. 19). Gulf Professional Publishing. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=M0ghO6oLXnEC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Tuna:+Physiology,+Ecology+and+Evolution&ots=gRgBAjy80U&sig=M262TqEN8YUFJfAL-EJjaY4gyuk&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-PT&lr=&id=M0ghO6oLXnEC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Tuna:+Physiology,+Ecology+and+Evolution&ots=gRgBAjy80U&sig=M262TqEN8YUFJfAL-EJjaY4gyuk&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Block, B., Jonsen, I., Jorgensen, S., Winship, A. J., Shaffer, S. A., Bograd, S. J., Hazen, E. L., Foley, D. G., Breed, G. A., Harrison, A. L., Ganong, J. E., Swithenbank, A., Castleton, M., Dewar, H., Mate, B. R., Shilinger, G. L., Schaeffer, K. M., Benson, S. R., Weise, M. J., Henry, R. W., Costa, D. P. (2011). Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature* 475, 86–90
- Collette, B. B., & Nauen, C. E. (1983). *Scombrids of the world: an annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date*. v. 2.
- Costello, M. J., Claus, S., Dekeyser, S., Vandepitte, L., Tuama, É. Ó., Lear, D., Tyler-Walters, H. (2015). Biological and ecological traits of marine species. *PeerJ*, 3, e1201
- Crossin, G. T., Heupel, M. R., Holbrook, C. M., Hussey, N. E., Lowerre-Barbieri, S. K., Nguyen, V. M., Cooke, S. J. (2017). Acoustic telemetry and fisheries management. *Ecological Applications*, 27(4), 1031-1049
- Decreto nº 10.736, de 29 de junho de 2021. Institui a Rede Nacional Colaborativa para a Gestão Sustentável dos Recursos Pesqueiros - Rede Pesca Brasil. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.736-de-29-de-junho-de-2021-329118015>
- Diaha, N.C., Zudaire, I., Chassot, E., Pecoraro, C., Bodin, N., Amande, MJ, Dewals, P., Romeo, M.U., Irie, Y.D., Barryga, B.D. (2015) Present and future of reproductive biology studies of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Atlantic Ocean. *Collect Vol Sci Pap ICCAT* 71:489–509

FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO

FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 – Blue Transformation in action. Rome, FAO

Filous, A., Friedlander, A. M., Toribiong, M., Lennox, R. J., Mereb, G., Golbuu, Y. (2022). The movements of yellowfin tuna, blue marlin, and sailfish within the Palau National Marine Sanctuary and the western Pacific Ocean. ICES Journal of Marine Science, 79(2), 445-456

Froese, R., D. Pauly. (2006). FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (06/2006).

Graham, B. S., Koch, P. L., Newsome, S. D., McMahon, K. W., Aurioules, D. (2010). Using isoscapes to trace the movements and foraging behavior of top predators in oceanic ecosystems. Isoscapes: understanding movement, pattern, and process on earth through isotope mapping, 299-318

Graham, J. B., Dickson, K. A. (2001). Chapter 4: Anatomical and physiological specializations for endothermy (Tuna: physiology, ecology, and evolution). Gulf Professional Publishing, vol. 19

Hays, G. C., Ferreira, C., Sequeira, A. N. N., Meekan, M. G., Duarte, C. M., Bailey, H., Baillleul, F., Bowen, W. D., Caley, M. J., Costa, D. P., Eguíluz, V. M., Fossete, S., Friedlaender, A. S., Gales, N., Gleiss, A., Gunn, J., Harcourt, R., Hazen, E. L., Heithaus, M. R., Heupel, M., Holland, K., Horning, M., Jonsen, I., Kooyman, G. L., Lowe, C. G., Madsen, P. T., Marsh, H., Philips, R. A., Rogton, D., Coudert-Ropert, Y., Sato., K., Shaffer, S. A., Simpfendorfer, C. A., Sims, D. W., Skomal, G., Takahashi, A., Trathan, P. N., Wikelski, M., Womble, J. N., Thums, M. (2016). Key questions in marine megafauna movement ecology. Trends in Ecology & Evolution, Volume 31, Issue 6, 463 – 475

Hazin, F. H. V. (2005). Grandes peixes pelágicos no Nordeste (atuns, agulhões e tubarões). Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva MMA-REVIZEE

Hazin, F. H. V., Travassos, P. E. (2007). A pesca oceânica no Brasil no Século 21. Revista Brasileira de Engenharia de Pesca, 2(1), 60-75.

Harrison, A. L., Costa, D. P., Winship, A. J., Benson, S. R., Bograd, S. J., Antolos, M., Block, B. A. (2018). The political biogeography of migratory marine predators. Nature Ecology & Evolution, 2(10), 1571-1578

Hilborn, R., Sibert, J. (1988). Is international management of tuna necessary? Marine Policy, 12(1), 31-39

Hoolihan, J. P., Wells, R. J. D., Luo, J., Falterman, B., Prince, E. D., & Rooker, J. R. (2014). Vertical and horizontal movements of yellowfin tuna in the Gulf of Mexico. Marine and Coastal Fisheries, 6 (1), 211-222

Hussey, N. E., Kessel, S. T., Aarestrup, K., Cooke, S. J., Cowley, P. D., Fisk, A. T., Whoriskey, F. G. (2015). Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world. *Science*, 348(6240), 1255642

ICCAT (2010). Comissão Internacional para Conservação do Atum no Atlântico. Capítulo 2.1.1: Yellowfin tuna 1ª edição

Le-Alvarado, M., Romo-Curiel, A. E., Sosa-Nishizaki, O., Hernández-Sánchez, O., Barbero, L., & Herzka, S. Z. (2021). Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) foraging habitat and trophic position in the Gulf of Mexico based on intrinsic isotope tracers. *PLoS one*, 16(2), e0246082.

Leroy, B., Nicol, S., Lewis, A., Hampton, J., Kolody, D., Caillot, S., Hoyle, S. (2015). Lessons learned from implementing three, large-scale tuna tagging programmes in the western and central Pacific Ocean. *Fisheries Research*, 163, 23-33

Lin, S. J., Musyl, M. K., Chiang, W. C., Wang, S. P., Su, N. J., Chang, C. T., Tseng, C. T. (2021). Vertical and horizontal movements of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in southeastern Taiwan. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 54(1), 1-21

Logan, J. M., Pethybridge, H., Lorrain, A., Somes, C. J., Allain, V., Bodin, N., Young, J. (2020). Global patterns and inferences of tuna movements and trophodynamics from stable isotope analysis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 175, 104775.

Madigan, D. J., Carlisle, A. B., Dewar, H., Snodgrass, O. E., Litvin, S. Y., Micheli, F., Block, B. A. (2012). Stable isotope analysis challenges wasp-waist food web assumptions in an upwelling pelagic ecosystem. *Scientific reports*, 2(1), 654

Martins, K., Pelage, L., Justino, A. K., Frédou, F. L., Júnior, T. V., Le Loc'h, F., Travassos, P. (2021). Assessing trophic interactions between pelagic predatory fish by gut content and stable isotopes analysis around Fernando de Noronha Archipelago (Brazil), Equatorial West Atlantic. *Journal of Fish Biology*, 99(5), 1576-1590.

MPA/MMA N° 12, Portaria Interministerial, de 02 de agosto de 2024. Estabelece as cotas de captura da espécie albacora-bandolim (*Thunnus obesus*) para as modalidades de permissionamento das embarcações de pesca brasileiras que atuam no Mar Territorial, na Zona Econômica Exclusiva e nas águas internacionais, e as medidas de monitoramento, controle e fiscalização para o ano de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mpa/pt-br/assuntos/noticias/mpa-e-mma-publicam-regras-que-definem-o-monitoramento-das-cotas-do-atum-e-afins-para-2024>

Ortiz, M. (2017). Review and analyses of tag releases and recaptures of yellowfin tuna ICCAT DB. *Collect Vol Sci Pap ICCAT*, 73(1): 228-243

Olson, R. J., Young, J. W., Ménard, F., Potier, M., Allain, V., Goni, N., Galván-Magaña, F. (2016). Bioenergetics, trophic ecology, and niche separation of tunas. In *Advances in marine biology* (Vol. 74, pp. 199-344). Academic Press.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

Pecoraro, C., Zudaire, I., Bodin, N., Murua, H., Taconet, P., Díaz-Jaimes, P., Chassot, E. (2017). Putting all the pieces together: integrating current knowledge of the biology, ecology, fisheries status, stock structure and management of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27, 811-841

Pereira, A. L., Benedito, E. (2007). Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. *Revista Biociências*, 13

PORTARIA SAP/MAPA N°554, de 21 de janeiro de 2022. Estabelece o Regimento Interno da Rede Nacional Colaborativa para a Gestão Sustentável dos Recursos Pesqueiros (Rede Pesca Brasil). Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-sap/mapa-n-554-de-21-de-janeiro-de-2022-375510080>

PMPA, 2024. Programa de Monitoramento da Pesca de Atuns e Afins no Brasil (MPA, MMA, UFRPE, DEPAQ).

Rangel, B. S. (2022). Ecofisiologia e relações tróficas de elasmobrânquios: biomarcadores como ferramentas para conservação. Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 254 p.

Ramirez, Z. R. S. (2015). Análise da composição e distribuição geográfica dos atuns da costa brasileira (Perciformes: Scombridae: Thunnini). Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Rohner, C. A., Naveira Garabato, A. C., Hearn, A. R. (2023). Movement and vertical habitat use of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in a vertically compressed habitat: the Galápagos Marine Reserve. *Journal of Fish Biology*, 103(6), 1264-1276

Safina, C. (2001). Chapter 11: Tuna Conservation (Tuna: Physiology, Ecology and Evolution). Gulf Professional Publishing, vol. 19

Sund, P. N., Blackburn, M., Williams, F. (1981). Tunas and their environment in the Pacific Ocean: a review. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 19, 443-512.

Schaefer, M. B., Chatwin, B. M., Broadhead, G. C. (1961). Tagging and recovery of tropical tunas - 1955-1959. *Inter-american Tropical Tuna Commission, bulletin vol. v, no. 5*

Schaefer, K. M., Fuller, D. W., Block, B. A. (2007). Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Marine Biology*, 152, 503-525.

Schmitz, O. J., Hawlena, D., & Trussell, G. C. (2010). Predator control of ecosystem nutrient dynamics. *Ecology letters*, 13(10), 1199-1209

Statistical Bulletin, ICCAT (2024). The current edition provides the catch and other statistics series starting in 1950 up to 2022. Seção 02, Vol.49.

Tawa, A., Ishihara, T., Uematsu, Y., Ono, T., Ohshimo, S. (2017). Evidence of westward transoceanic migration of Pacific bluefin tuna in the Sea of Japan based on stable isotope analysis. *Marine Biology*, 164(4), 94

Queiroz, N., Humphries, N. E., Mucientes, G., Hammerschlag, N., Lima, F. P., Scales, K. L., Sims, D. W. (2016). Ocean-wide tracking of pelagic sharks reveals extent of overlap with longline fishing hotspots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(6), 1582-1587.

Vaihola, S., Yemane, D., Kininmonth, S. (2023) Spatiotemporal Patterns in the Distribution of Albacore, Bigeye, Skipjack, and Yellowfin Tuna Species within the Exclusive Economic Zones of Tonga for the Years 2002 to 2018. *Diversity*, 2023, 15.10: 1091

Vaske Jr, T., Vooren, C., Lessa, R. (2003). Estratégia alimentar da albacora-laje (*Thunnus albacares*) e cavala-empinge (*Acanthocybium solandri*) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. *Boletim do Instituto de Pesca*, 29(2), 173-181

Weng, K. C., Stokesbury, M. J. W., Boustany, A. M., Seitz, A. C., Teo, S. L. H., Miller, S. K., Block, B. A. (2009). Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags. *Journal of Fish Biology*, 74(7), 1434-1449

Wright, S. R., Righton, D., Naulaerts, J., Schallert, R. J., Bendall, V., Griffiths, C., Collins, M. A. (2021). Fidelity of yellowfin tuna to seamount and island foraging grounds in the central South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 172, 103513.

## Cap. I

### Marcadores Naturais: Dinâmica Trófica

---

#### Artigo 1:

*“Feeding behaviour of yellowfin tuna around two insular regions on the western Atlantic Ocean”*

Primeiro manuscrito da tese, publicado em 04/01/2024 no periódico:  
*Journal of Fish Biology*

DOI: 10.1111/jfb.15646

Received: 26 April 2023 | Revised: 27 October 2023 | Accepted: 11 December 2023  
DOI: 10.1111/jfb.15646

REGULAR ARTICLE



## Feeding behavior of yellowfin tuna around two insular regions of the western Atlantic Ocean

Karla Martins<sup>1</sup> | Yuri Niella<sup>2</sup> | Fernanda Albuquerque<sup>3</sup> |  
Leandro Nolé Eduardo<sup>4</sup> | Paulo Oliveira<sup>3</sup> | Paulo Travassos<sup>1</sup>

## Feeding behaviour of yellowfin tuna around two insular regions of the western Atlantic Ocean

Karla Martins<sup>1\*</sup>, Yuri Niella<sup>2</sup>, Fernanda Albuquerque<sup>3</sup>, Leandro Nolé Eduardo<sup>4</sup>, Paulo Oliveira<sup>5</sup>, Paulo Travassos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Ecologia Marinha, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

<sup>2</sup>School of Natural Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia

<sup>4</sup>MARBEC, Univ. Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, Sète, France

<sup>5,3</sup>Laboratório de Etologia de Peixes, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

Corresponding author: [karla.martins@ufrpe.br](mailto:karla.martins@ufrpe.br)

Primeiro manuscrito da tese, publicado em 2024 no periódico *Journal of Fish Biology*  
DOI: 10.1111/jfb.15646

### ABSTRACT

The yellowfin tuna is a very abundant tropical tuna species in the western equatorial Atlantic Ocean and an important fishery resource for the Brazilian tuna fleet. In this study we performed stable isotope analysis to better understand the spatial trophodynamics and dietary changes in yellowfin tuna around two insular marine protected areas in Brazil. A total of 65 yellowfin tuna specimens measuring between 47 and 138 cm LT (total length) were sampled around the archipelagos of Fernando de Noronha (FNA; n = 34) and Saint Peter and Saint Paul (SPSPA; n = 31) between July 2018 and September 2019. Bayesian mixing models and generalized additive models were used to investigate the contributions of four different prey items (zooplankton, cephalopods, fish larvae, and flying fish) to yellowfin tuna diet in each area and their potential changes in relation to predator growth. The four prey items were found to have different overall contributions between the two studied areas, with zooplankton being the most important prey in FNA, whereas flying fish was the most relevant prey to the species' diet in SPSPA. Significant changes in the species diet by size were also found, with fish smaller than 90 cm (TL) having a more generalist diet and larger animals relying more on consuming larger and more nutritious prey (i.e., flying fish). Our results suggest that these two marine protected areas play an important role in ocean dynamics, providing important and different foraging grounds for the development of this predator species.

**Keywords:** behaviour, feeding, stable isotope analysis, trophodynamics, yellowfin tuna

## 1. Introduction

In fisheries management, understanding how migratory species use and move between habitats in time and space and with life processes (i.e., foraging, reproduction) are performed in which environments is of utmost importance (Logan et al., 2020). This is relevant especially as global anthropogenic impacts advance, with ocean warming expected to strongly affect species distribution, trophic interactions, and the balance of food webs (Salvetat et al., 2022). Ecological knowledge of energy flow and trophic interactions is pertinent for conservation, including the integrated assessment of different marine resources with multi-faceted approaches to subsidise the development of ecosystem-based management policies (Niella et al., 2017; Coletto et al., 2021). Aspects of marine predator trophic ecology (e.g., feeding habits, foraging strategies, estimates of trophic position) can be used as valuable metrics to describe food web properties and ecosystem structure and identify potential management approaches across relevant time scales (Houssard et al., 2017).

*Thunnus albacares* (Yellowfin tuna - Scombridae family) is a highly migratory marine predator, capable of exploring tropical and subtropical seas worldwide, except for the Mediterranean (Collete and Nauen, 1983). Generally, yellowfin tuna has a diet composed by fish, crustaceans, and cephalopods, presenting an opportunistic feeding behaviour, which is responsible for rapid growth rates and high reproductive outputs (Jiang et al., 2022; Pecoraro et al., 2017; Rohit et al., 2010; Vaske-Jr and Castello, 1998). Some studies have noted changes in the feeding behavior of yellowfin tuna at different sizes classes (Maldeniya, 1996; Graham et al., 2010). Understanding tuna diet at different ocean areas and life cycle is of great relevance to better understand the behaviour of the species in relation to the use and occupation of the oceanic pelagic habitat. However, knowledge about the changes in the feeding dynamics of yellowfin tuna during their growth in the western equatorial portion of the Atlantic Ocean is still scarce.

In this area, oceanographic processes transform oligotrophic waters into highly productive environments around oceanic islands (Lima et al., 2016). They favour the enrichment of primary production in insular habitats, attracting marine life, that finds in these environments an opportune place for the development of its biological functions (Salvetat et al., 2022; Silva et al., 2019). This is the case of Fernando de Noronha and Saint Peter and Saint Paul archipelagos, which represents high fishing interest due to local aggregations of yellowfin tuna. The yellowfin tuna is considered as a single fishing stock

for the whole Atlantic, and their catches have averaged around 142,000 t over the last five years, with Brazil accounting for 15,500 t (10.9%) of this total (ICCAT, 2019). Although these catches are above the TAC (Total Allowable Catch; 110,000 t), the stock is not overfished subject to overfishing, according to the latest stock assessment conducted by ICCAT in 2019 (ICCAT, 2019).

Recognizing that the integrated management of highly migratory species requires understanding how and why species use and move between available habitats in time and space (Martínez-Rincón and Acosta-Pachón, 2022) and the importance to better understand the yellowfin tuna trophodynamics, this study aimed at using stable isotope analysis for (i) identifying possible differences in the diet composition of this species between the archipelagos of Fernando de Noronha and Saint Peter and Saint Paul; and (ii) investigating potential differences in diet by size across these two insular areas.

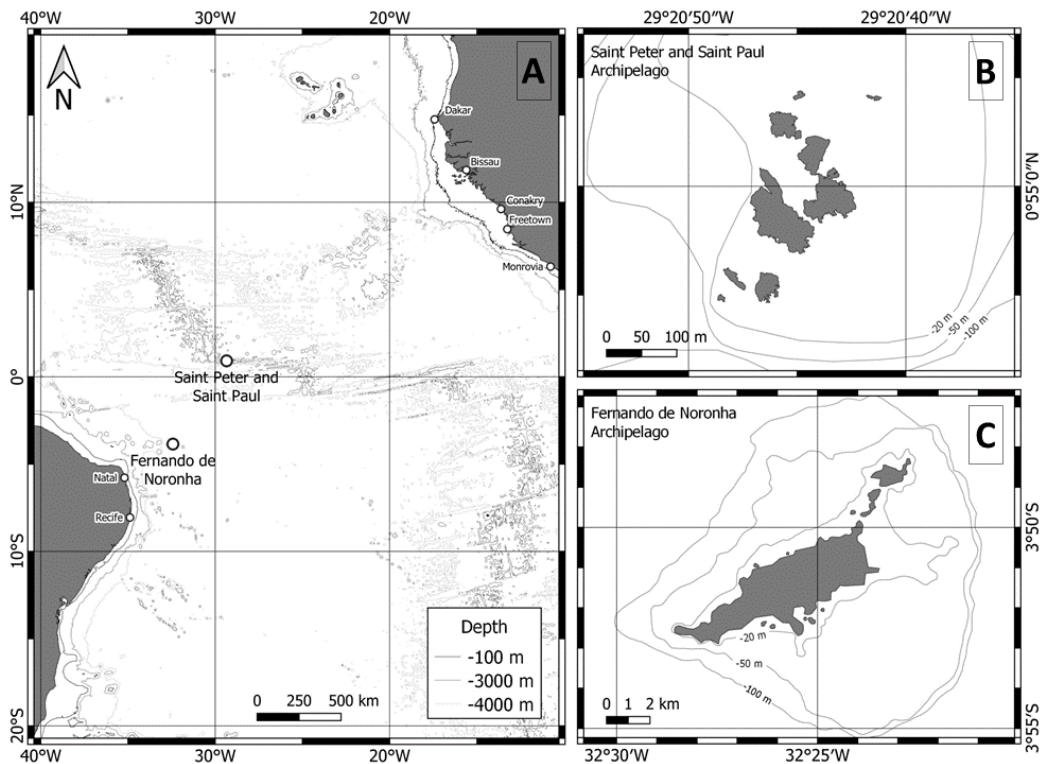
To achieve these objectives, the stable isotope biomarker methodology was used, which can represent what has already been time integrated assimilated by the consumer (Nielsen et al., 2018), by contributing to the investigation of trophic interactions associated with resources and habitat use (Fry, 2006; Graham et al., 2010), indicating the origin of primary production and predator movements between different environments and gradients (i.e., nearshore versus offshore food webs) (Fry, 2006), and as proxy to the trophic position of organisms (Post, 2002). Our results are expected to provide insights into the relevance of two oceanic regions with elevated fishery importance in the Western Atlantic Ocean for the early development of an important tropical tuna species.

## **2. Materials and methods**

### *2.1. Study sites*

The study sites comprised two insular regions along the north-eastern coast of Brazil (Fig. 1) and included the marine protected areas of Fernando de Noronha (FNA) and Saint Peter and Saint Paul (SPSPA) archipelagos (Fig. 1). Distant approximately 340 km offshore (3.86°S, 32.42°W), the FNA is composed of 21 islands and islets (Serafini et al. 2010). The main island has a sharp relief and two distinct sides and is influenced by the South Equatorial current (Serafini et al., 2010). The SPSPA is located ~1,000 km from the coast and is formed by a small group of rocky islets (0.92°N, 29.34°W). This archipelago is directly influenced by South Equatorial current that flowing at the surface and Submerged Equatorial counter-current flowing along the subsurface layer (Travassos et al., 1999). The geographical positioning right at the

Atlantic Dorsal Ridge between the African and South American continents (Fig. 1) is responsible for a high diversity in marine life, which use this region for resting, feeding, and breeding (Campos et al., 2015) and classified as EBSA (Ecologically or Biologically Significant Area) (CBD, 2014). Small-scale local upwelling processes as a consequence of the Island Effect are responsible for significant increases in productivity at both FNA and SPSPA regions (Silva et al., 2019, Travassos et al., 1999).



**Figure 1.** Location of the study sites in the western Atlantic Ocean (A) and the areas in detail on the right side of the map: Saint Peter and Saint Paul (B) and Fernando de Noronha (C) Archipelagos.

## 2.2. Sample collection

Tuna tissue samples were collected aboard fishing vessels using rod-and-reel gear in FNA and handline in SPSPA. Sampling occurred during dedicated scientific fishing cruises of about 8-10 days in FNA (two expeditions in 2018 – July/October and five in 2019 - January, March, April, May, and September) and 15 days in SPSPA (four expeditions from July 2018 to September 2019). Muscle samples were collected during fish evisceration at the end of each fishing day, at which the respective fish's total length (cm) was recorded. The yellowfin tuna specimens captured ranged between 42–128 cm (FNA; N = 31) and 62–138 cm (SPSPA; N = 34). A total of 65 muscle tissues (~ 5 g) were removed from the anterior dorsal region of the fish using a scalpel, immersed in 5 ml cryovials, and kept frozen at -18°C until further laboratory processing.

### 2.3. Stable isotopes analysis

The yellowfin tuna muscle tissue samples were washed with distilled water and oven-dried at 60°C for 48h (Garcia et al. 2007). After drying, the samples were grounded and stored in cryotubes. Stable isotope analyses for carbon and nitrogen were performed with a continuous flow mass spectrometer (Delta V+ with a conflo IV interface, Thermo Scientific, Bremen, Germany) linked to an elemental analyser (Flash EA 2000, Thermo Scientific, Milan, Italy), at the Ocean Spectrometry Center (Plouzané, France). The results were expressed in  $\delta$  based on international standards (Pee Dee Belemnite for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\text{N}^2$  in the air for  $\delta^{15}\text{N}$ ) (Peterson and Fry, 1987) following the formula:

$$\delta X (\text{‰}) = \left[ \left( \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 10^3$$

Where R is the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  or  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  or each isotope (X). The experimental precision, based on the standard deviation of repeated measurements from an internal laboratory standard (Thermo Acetanilide, Plouzané, France), was found to be <0.11‰ for  $\delta^{15}\text{N}$  and <0.04‰ for  $\delta^{13}\text{C}$ . Since the C/N of all individuals ranged between 3.2 and 3.4 it was not necessary to perform lipid extraction procedures, which help reduce bias in isotopic results when lipid contents are high (C/N > 4) or when comparing species with varying lipid contents (Post, 2002). The trophic enrichment factors were set to 1.0 for  $\delta^{13}\text{C}$  (standard deviation = 1.0) and 2.6 for  $\delta^{15}\text{N}$  (standard deviation = 1.5), as per the values found in Guo et al. (2016) and Olson et al. (2010) respectively.

### 2.4. Yellowfin tuna potential prey sources

In general, yellowfin tuna has a very diverse diet and for the choice of prey sources we observed diet studies of the species in the study areas. Stomach content analysis from individuals collected in FNA found a major contribution from teleost fishes, particularly members of the Diodontidae and Exocoetidae family, while microcrustaceans and cephalopods were the next most frequent items (Martins et al., 2021). Vaske Jr et al., (2003) and Albuquerque et al., (2019) observed that yellowfin tuna fed mostly on *Cheilopogon cyanopterus* (flying fish) and other fish from the Exocoetidae family in SPSPA. Therefore, we selected the groups of potential prey sources for the yellowfin tuna diet within our study areas, including cephalopods (*Enoploteuthis leptura*), zooplankton (> 2000  $\mu\text{m}$  - chaetognaths, decapods, and fish larvae), fish larvae (15-20 mm) and flying fish (*Cheilopogon cyanopterus*). Isotopic database for these prey sources were obtained from studies conducted in the same areas: Cephalopods, zooplankton and fish larvae were collected in FNA (ABRAÇOS 2 - Bertrand, 2017; Figueiredo et al., 2020; Eduardo et al.,

2023), whereas flying fish samples were obtained from SPSPA (Albuquerque et al., 2022). Please see the aforementioned literature for more information on field and laboratory procedures.

### 2.5. Statistical approach

All analyses were performed in R (version 4.2.0). The Bayesian approach requires a complete mixing between dietary sources, and predictions of diet contribution are known to decrease proportionally to the number of sources included (Parnell et al., 2010; Phillips et al., 2014). To assess the suitability of including all prey sources (i.e., cephalopods, flying fish, fish larvae and zooplankton) in the modelling, we used the isoscape bivariate diagram of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  for the yellowfin tuna and each source group (Layman et al., 2012). This perspective confirmed that all sources were suitable for investigating the diet of yellowfin tuna in these regions. Prey signatures after TEF application were symbolised in the same two-dimensional isotope space as the consumers to verify a geometric prerequisite for the use of MixSIAR. Mixing models were only performed once the isotope ratios of the predators were within the mixing polygon demarcated by the base source signatures representing the trophic boundaries of the system (Philips et al., 2005). Due to the placement of all samples (from both FNA and SPSPA) within the isospace created between the mean and standard deviations from all individual source groups (Fig. 2). To remove bias in comparing the tuna diets between the two insular areas, we standardised the fish sizes to only include the individuals ranging between 60 and 120 cm total length (TL), i.e., the size interval sampled at both areas (Fig. S1).

Bayesian stable isotope mixing models were used to calculate the proportional contributions of prey sources to the yellowfin tuna diet in the two different study areas using the MixSIAR package (Stock et al., 2018). Models were run independently for FNA and SPSPA to avoid potential artefacts in the calculated values by pooling together fish caught at different sites. The final models were run using a three million chain length and included fish identification as a categorical random variable and size (total length) as a continuous fixed effect. Gelman-Rubin diagnostics were used to inspect for model convergences and confirm the good model fit for both study areas (Stock et al., 2018). To determine whether the prey sources contributed similarly to the species' diet within the two studied areas, we used a paired two-sample t-test to the Bayesian mixing model outputs from FNA and SPSPA. The prey source contributions in relation to fish size were

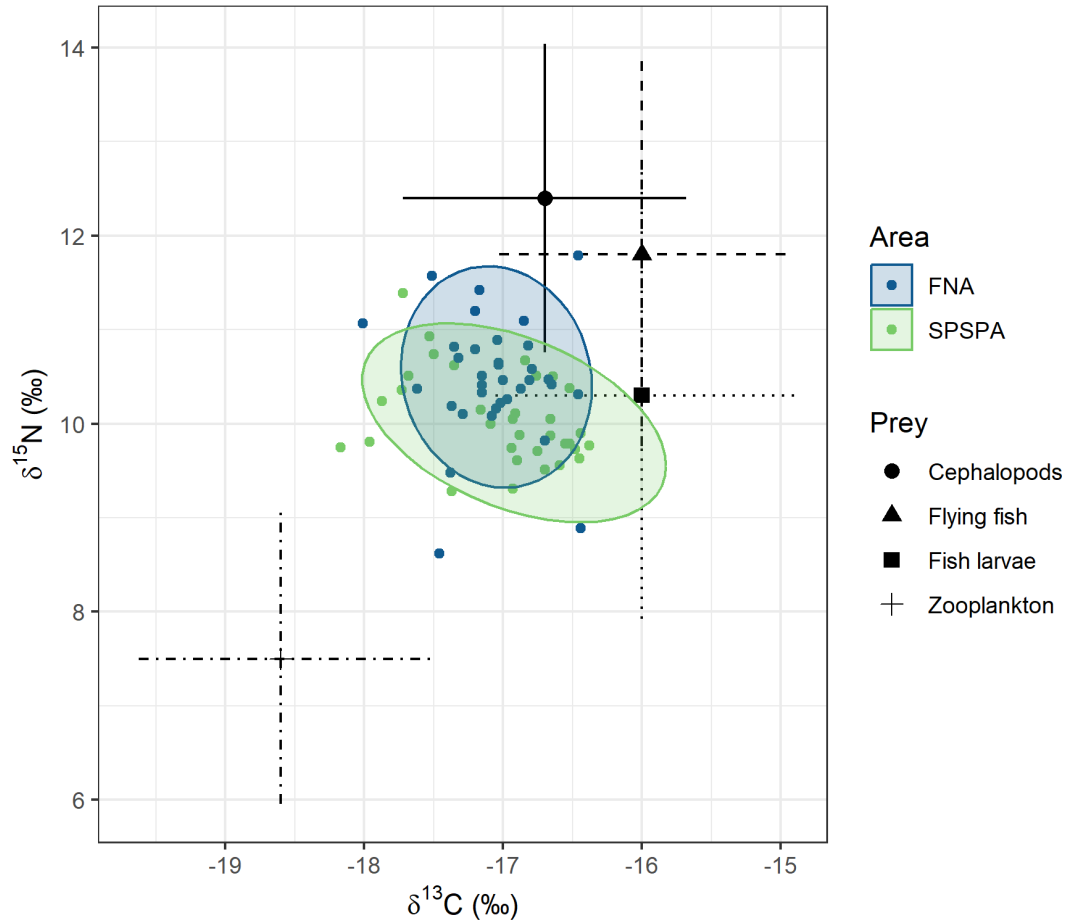
assessed for each region with a Generalised Additive Model (GAM) using the mgcv package (Wood, 2006). These models included the variables' total length as a fixed term and were fit independently for each prey using a gaussian family of the error distribution. Additionally, the level of similarity among the yellowfin tuna diets between the two areas was assessed by calculating the mean Bayesian overlaps at both the 50% and 95% levels.

### 3. Results

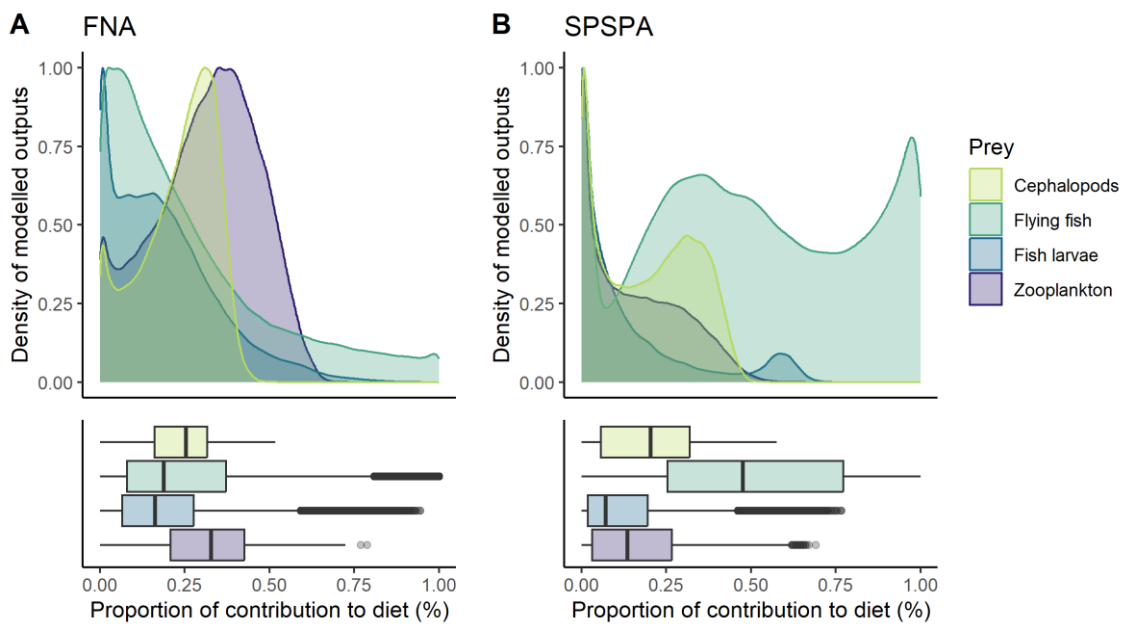
Tuna predators were mostly juveniles and adults ( $L_{50}=99.2$ ), ranging in total length from 62 to 138 cm (SPSPA) and 47 to 128 cm (FNA) (Table 1). The yellowfin tuna from FNA showed the highest  $\delta^{15}\text{N}$ , while the  $\delta^{13}\text{C}$  values were higher for the individuals sampled in SPSPA (Table 1, Figure 2). There was a significant difference in the prey contributions to the yellowfin tuna diet between the two areas ( $p$ -value  $<0.001$ ). Modelled dietary contributions in FNA indicated a similar low contribution for most prey sources (Fig. 3), with zooplankton having a slightly higher influence (Table 2). The yellowfin tuna diet in SPSPA was composed mostly of flying fish ( $>50\%$  mean; Table 2), with a much lower contribution from the other sources (Fig. 3). The GAM indicated a significant influence of fish size upon the contributions of the different prey sources (Table 3). Trends were similar in the two study areas, with significant shifts in diet composition when individuals were larger than 90 cm (i.e. near the adult stage at 115 cm), when the contributions of cephalopods, fish larvae and zooplankton decreased, and the influence of flying fish increased (Fig. 4). The diet overlaps between the two areas were found to be lower than 40% at the 50% level (FNA x SPSPA = 37.9%; SPSPA x FNA = 36.7%), and around 80% at the 95% level (FNA x SPSPA = 80.2%; SPSPA x FNA = 83.4%).

**Table 1.** Stable isotopes mean and standard deviation (SD) values (‰) for sampled individuals of yellowfin tuna by study area (Area), including the total length (TL; cm) ranges and the number of individuals samples (N).

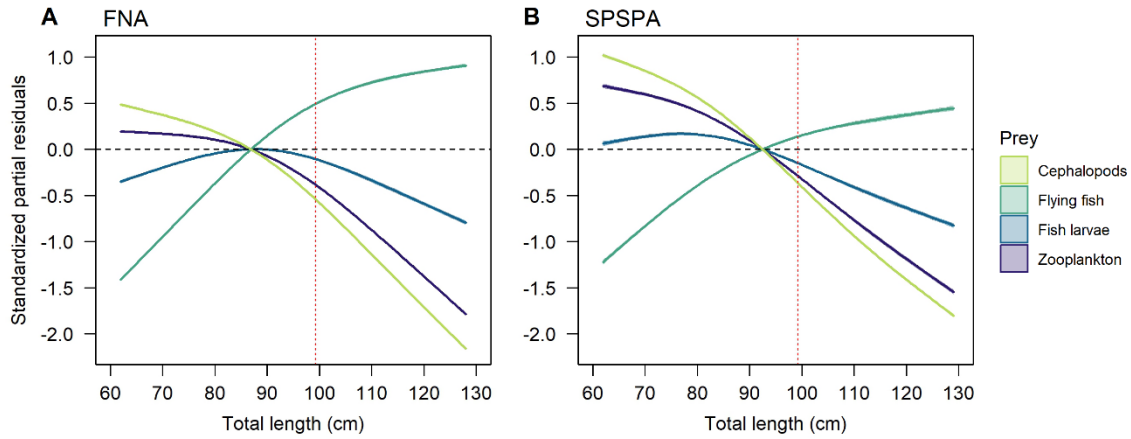
Area	TL	N	$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$		
			Min	Max	Mean $\pm$ SD	Min	Max	Mean $\pm$ SD
FNA	47-128	34	-18.91	-16.44	-17.06 $\pm$ 0.34	8.62	11.79	10.46 $\pm$ 0.34
SPSPA	62-138	31	-18.17	-16.38	-16.90 $\pm$ 0.50	9.28	11.39	9.90 $\pm$ 0.48



**Figure 2.** Isoscape biplots of prey sources (Zooplankton, Cephalopods, flying fish and Fish larvae) and 65 yellowfin tuna (points coloured by study area) tracer data.



**Figure 3.** Density distributions of modelled diet contributions from four prey sources on the diet of yellowfin tuna in (A) Fernando de Noronha (FNA) and (B) Saint Peter and Saint Paul archipelago (SPSPA).



**Figure 4.** Generalised Additive Models (GAM) of prey source contribution to yellowfin tuna diet concerning total length. Shaded areas and horizontal lines represent the 95% confidence intervals and null effects, respectively. The dotted red line marks the size of the first sexual maturity for the species ( $L_{50} = 99.2$  cm; Diaha et al., 2016).

**Table 2.** Stable isotope values for prey sources sampled in Fernando de Noronha and Saint Peter and Saint Paul Archipelago, including mean and standard deviation (sd) values for the two, analysed samples. The mean (sd) percentages of modelled diet contribution per source are also included, with the main contributors highlighted in bold.

Prey source	n	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$		Modelled contribution to the diet			
		Mean	SD	Mean	SD	FNA		SPSPA	
						Mean	SD	Mean	SD
Cephalopods	12	-17.7	0.20	9.8	0.66	26.4	11.5	19.1	14.2
Fish larvae	6	-18.5	0.40	7.1	0.60	18.1	15.3	14.4	17.9
Flying fish	12	-17.0	0.27	9.2	1.40	21.9	23.3	<b>51.2</b>	31.6
Zooplankton	13	-19.6	0.40	4.9	0.40	<b>33.5</b>	15.6	15.3	13.6

**Table 3.** Prey source contributions concerning yellowfin tuna size for each region were assessed with a Generalised Additive Models (GAM). Included are the respective coefficient estimates (Est), reference degrees of freedom (Ref.df), F-value (F), p-value ( $p$ ) and percentages of deviance explained (Dev) from each model.

Area	Prey	Est	Ref.df	F	$p$	Dev
FNA	Zooplankton	3.99	4.00	24820	<0.001	29.0%
	Fish larvae	3.97	4.00	1263	<0.001	2.0%
	Flying fish	3.98	4.00	21720	<0.001	26.3%
	Cephalopods	3.99	4.00	75346	<0.001	55.4%
SPSPA	Zooplankton	3.96	3.99	14051	<0.001	16.8%
	Fish larvae	3.95	3.99	2443	<0.001	3.4%
	Flying fish	3.95	3.99	6455	<0.001	8.5%
	Cephalopods	3.98	4.00	37044	<0.001	34.7%

#### 4. Discussion

Stable isotope analysis provided insights into the trophic dynamics of yellowfin tuna in the equatorial western Atlantic Ocean, including diet shifts and trophic structure. Our results indicated that in FNA, the species predate upon higher trophic levels than in SPSPA due to the highest  $\delta^{15}\text{N}$  values. However, the low contribution values (i.e., < 35%)

in the FNA of the prey sources included indicate a greater diversity of prey and that some other species might be important to the yellowfin tuna diet in this region. The items analysed in our study for the FNA tunas, Zooplankton, Cephalopods, Flying fish and Fish larvae, showed low food contribution, denoting reduced importance in the diet in this area. This result suggests that this predator most likely feeds on various primary and secondary consumers. This is because the  $\delta^{15}\text{N}$  values represent the diversity of nutrient levels (Graham et al., 2010). In FNA, 24 prey items were identified in the diet of juvenile yellowfin tuna, of which crustaceans, molluscs and small fishes were the most prey items that contributed to the nutrition of the species according to the Relative Importance Index (IRI), respectively (Martins et al., 2021). The higher  $\delta^{13}\text{C}$  values observed in SPSPA may reflect the diversity of food sources available to yellowfin tuna in this region. Albuquerque et al. (2019) identified an even broader diet for the yellowfin tuna individuals analysed in SPSPA, where 31 potential prey items were identified as dietary components, including molluscs, crustaceans, different species of flying fish and deep-sea fish (i. e., Myctophidae). Myctophids are vertical migrants and occasionally serve as food sources for tunas (da Silva et al., 2019), playing a significant role in energetic pathways by bringing energy from deeper habitats, actively transporting the carbon they ingest to epipelagic predators in shallower regions (Eduardo et al., 2021).

Areas associated with different oceanographic processes present distinct trophic dynamics at the primary producer level, radiating into regional food webs. These processes are responsible for marine regions represented by the isotopic signatures of the species that occur there (Carlisle et al., 2012). The mixing model results showed considerable dietary inputs from flying fish to the diet of yellowfin tuna in SPSPA. The high abundance of flying fish in SPSPA makes it an essential species in the local pelagic food web, targeted by tunas, birds, billfishes and sharks (Monteiro et al., 1998; Vaske-Jr. et al., 2003). When a region is enriched in prey sources, it is presented as an energetic advantage to wide-ranging predators (White and Samhouri, 2011), thus influencing their length of stay around these areas. The high aggregations of flying fish in SPSPA, particularly during their reproductive period (Lessa et al., 1999; Vaske Jr. et al., 2003), may explain its strong contribution to the diet of yellowfin tuna in this area, located in the middle of an oceanic oligotrophic zone. Acoustic telemetry experiments suggest that yellowfin tuna remain in the vicinity of the SPSPA as a trophic strategy (Pereira, 2007). Despite being a widely distributed species, yellowfin tuna may be associated with oceanic islands due to increased food availability (Wright et al. 2021).

Body size is an important factor in predator-prey interactions, with larger predators capable of targeting a wider range of prey sizes (Ménard et al., 2006). In addition, marine predator species also occupy higher trophic levels as they grow, and studies have shown that yellowfin tuna change their feeding patterns when their body size increases (Ménard et al., 2007). The yellowfin tuna sampled near Fish Aggregating Devices off Hawaii (Graham et al., 2010) and on the southwest coast of Taiwan (Weng et al., 2015) have been found to change their diet at 50 cm furcal length. A meta-analysis including data from global oceanic areas showed that ontogenetic diet shifts were also observed at around 50 cm furcal length (Pethybridge et al., 2018). However, the changes found in the feeding patterns of yellowfin tuna in this study, was observed in fish larger than 90 cm total length. This phenomenon of change in feeding pattern as the predator increases in size usually occurs through a reduction in the consumption of smaller prey such as squid, shrimp larvae and zooplankton organisms, and an increase in the ingestion of larger animals such as fish. In addition, the changes in diet patterns of this tuna may result from increased mouth size, predation agility, diving efficiency, and differences in habitat use throughout ontogeny (Davenport and Bax, 2002; Madigan et al., 2012; Jiang et al., 2022). The demand for high-energy prey in the diet of yellowfin tuna shortly before individuals reach sexual maturity reflects different feeding strategies, specific physiological abilities, and energetic requirements to initiate reproduction.

Tunas invest much energy in foraging in oligotrophic pelagic environments where prey availability is low (Le-Alvarado et al., 2021). Island of oligotrophic areas are important environments for biodiversity conservation, contributing to the recovery of species populations and the maintenance of ecosystem services, aggregating more food and are therefore important for the life cycle of species (Ferreira et al., 2022). In this study, we found low feeding overlap between the two archipelagos. The most likely explanation is that yellowfin tuna targeting different prey in each region. Food partitioning, specialisation on distinct prey items, and different forms of habitat use (e.g., feeding depths, space distribution) are strategies to reduce resource competition and maximise energetic gain (Lucena et al., 2000; Martins et al., 2021). The yellowfin tuna indicates preference for prey species that are more abundant and available near the surface, such as flying fish in the SPSPA, and occasionally other prey from deeper habitats (da Silva et al., 2019). Therefore, local prey availability in each island seems to be the main reason responsible for the differences observed in yellowfin tuna diet between the two regions.

Understanding how migratory fish use different areas is critical to interpreting the ecology and life history of the species. It is possible that these two Marine Protected Areas are capable of playing key ecological roles as energy enrichment areas for tunas. We observed a significant shift in the feeding patterns of yellowfin tuna through changes in prey type preferences related to predator size. Assessing the ecological role of marine predators, especially due to their ecological and economic importance (Dominguez et al., 2015, Vaske Jr. et al., 2008, Zeineddine et al., 2022), contribute to the development of management policies based on an ecosystem approach (Niella et al., 2017; Coletto et al., 2021). The combination of data from natural (stable isotopes) and artificial (acoustic and satellite tags) markers becomes necessary to understand better species distribution, habitat use and spatiotemporal dynamics in feeding habits.

### Supplementary material

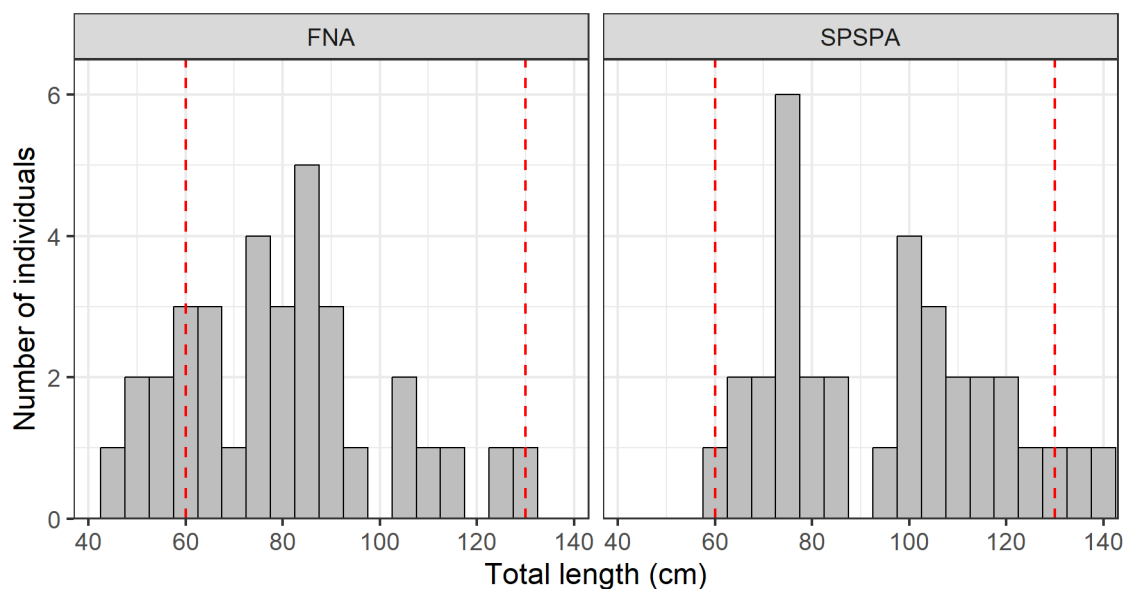


Figure S1. Distribution of sampled yellowfin tuna sizes per study area (Fernando de Noronha archipelago = FNA; Saint Peter and Saint Paul archipelago = SPSPA). The vertical dashed lines represent fish size used to include only the individuals ranging between 60 and 125 cm total length (TL).

### References

Albuquerque FV, Navia AF, Vaske-Jr T, Crespo O, Hazin FHV (2019) Trophic ecology of large pelagic fish in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. *Marine and Freshwater Research*, 70(10), 1402-1418. <https://doi.org/10.1071/MF18352>

Albuquerque FV (2022) Interações tróficas entre grandes peixes pelágicos no Arquipélago São Pedro e São Paulo com base em isótopos estáveis. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas

Anon (2004) Sesión de evaluación ICCAT 2003 del stock de rabil (Mérida, México, 21-26 de julio). Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT, 56(2): 443-527

Bard FX, Cayré P (1986) Commentaires sur les migrations de l'albacore (*Thunnus albacares*) en Atlantique Est. Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT, 25(1): 11-29

Bertrand A (2017) ABRACOS 2 cruise, R/V Antea. <https://doi.org/10.17600/17004100>

Carlisle AB, Kim SL, Semmens BX, Madigan DJ, Jorgensen SJ, Perle CR, Anderson SD, Chapple TK, Kanive PA, Block BA (2012) Using stable isotope analysis to understand the migration and trophic ecology of northeastern Pacific white sharks (*Carcharodon carcharias*). PloS one, 7(2), e30492. doi: 10.1371/journal.pone.0030492

Campos DMDAR, Silva AD, Sales NDS, Oliveira REMCC, Pessanha ALM (2015) Trophic relationships among fish assemblages in a mudflat within Brazilian marine protected area. Brazilian Journal of Oceanography, 63, 135-146. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592015091306302>

CBD (2014) Ecologically or Biologically Significant Marine Areas (EBSAs) Special places in the world's oceans. Wider Caribbean and western Mid-Atlantic, 2nd ed. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Recife, Brazil

Coletto JL, Botta S, Fischer LG, Newsome SD, Madureira LS (2021) Isotope-based inferences of skipjack tuna feeding ecology and movement in the southwestern Atlantic Ocean. Marine Environmental Research, 165, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105246>

Collette BB, Nauen CE (1983) Scombrids of the world: an annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. v. 2, FAO Fisheries Synopsis No. 125, Volume 2

da Silva GB, Hazin HG, Hazin FHV, Vaske-Jr T (2019) Diet composition of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) caught on aggregated schools in the western equatorial Atlantic Ocean. Journal of Applied Ichthyology, 35(5), 1111-1118. <https://doi.org/10.1111/jai.13949>

Davenport SR, Bax NJ (2002) A trophic study of a marine ecosystem off southeastern Australia using stable isotopes of carbon and nitrogen. Canadian Journal Fishing Aquatic Science. 59, 514–530. <https://doi.org/10.1139/f02-031>

DeNiro MJ, Epstein S (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochimica et cosmochimica acta, 42(5), 495-506. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90199-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90199-0)

DeNiro MJ, Epstein S (1981) Hydrogen isotope ratios of mouse tissues are influenced by a variety of factors other than diet. *Science*, 214(4527), 1374-1376. <https://doi.org/10.1126/science.7313700>

Diaha NC, Zudaire I, Chassot E, Barrigah DB, Irie YD, G beazere DA, Kouadio D, Pecoraro C, Romeo MU, Murua H, Amade MJ, Dewals P, Bodin N (2016) Annual monitoring of reproductive traits of female yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Atlantic Ocean. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 72(2):534-548

Dominguez PSA, Zeineddine GC, Rotundo MM, Barrella W, Ramires M (2016) A pesca artesanal no arquipélago de Fernando de Noronha (PE). *Boletim do Instituto de Pesca*, 42(1), 241-251. <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2016v42n1p241>

Eduardo LN, Bertrand A, Mincarone MM, Martins JR, Frédou T, Assunção RV, Lucena-Fredou F (2021) Distribution, vertical migration, and trophic ecology of lanternfishes (Myctophidae) in the Southwestern Tropical Atlantic. *Progress in Oceanography*, 199, 102695

Ferreira HM, Magris RA, Floeter SR, Ferreira CE (2022) Drivers of ecological effectiveness of marine protected areas: A meta-analytic approach from the Southwestern Atlantic Ocean (Brazil). *Journal of Environmental Management*, 301, 11388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113889>

Fioravanso AG, Nicolodi JL (2021) Governança ambiental em áreas marinhas protegidas: o contexto do Arquipélago de Fernando de Noronha, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 58. <https://dx.doi.org/10.5380/dma.v58i0.74152>

Figueiredo GA, Schwamborn R, Bertrand A, Munaron JM, Le Loc'h F (2020) Body size and stable isotope composition of zooplankton in the western Tropical Atlantic. *Journal of Marine Systems* doi: 10.1016/j.jmarsys.2020.103449

Fry B (2006) *Stable isotope ecology* (Vol. 521, p. 318), ISBN: 978-0-387-33745-6, New York: Springer

Garcia AM, Hoenighaus DJ, Vieira JP, Winemiller KO (2007) Isotopic variation of fishes in freshwater and estuarine zones of a large subtropical coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(3-4), 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.02.003>

Graham BS, Koch PL, Newsome SD, McMahon KW, Aurioles D (2010) Using isoscapes to trace the movements and foraging behavior of top predators in oceanic ecosystems. In *Isoscapes — Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth Through Isotope Mapping*, pp. 299–318. Ed. by J. B. West, G. J. Bowen, T. E. Dawson, and K. P. Springer Netherlands, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3354-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3354-3_14)

Guo L, Sun CP, Ren WZ, Zhang J, Tang JI, Hu LL, Chen X (2016) Meta-analysis of stable carbon and nitrogen isotopic enrichment factors for aquatic animals. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. The Journal of Applied Ecology*, 27(2), 601-610. <https://europepmc.org/article/med/27396136>

Hazin FHV (1993) Grandes peixes pelágicos no Nordeste (atuns, agulhões e tubarões). Refinamento dos dados pretéritos sobre prospecção pesqueira do projeto de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva, MMA-REVIZEE

Houssard P, Lorrain A, Tremblay-Boyer L, Allain V, Graham BS, Menkes CE, Letourneur Y (2017) Trophic position increases with thermocline depth in yellowfin and bigeye tuna across the Western and Central Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 154, 49-63. <https://10.1016/j.pocean.2017.04.008>

Heidrich KN, Juan-Jordá MJ, Murua H, Thompson CDH, Meeuwig JJ, Zeller D (2022) Assessing progress in data reporting by tuna Regional Fisheries Management Organizations. *Fish and Fisheries*, 23, 1264– 1281. <https://doi.org/10.1111/faf.12687>

Holland KN, Kleiber P, Kagiura SM (1999) Different residence times of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, and bigeye tuna, *Thunnus obesus*, found in mixed aggregations over a seamount. *Fishery Bulletin*. 97: 392-395. [http://www.soest.hawaii.edu/pfrp/reprints/holland\\_kleiber\\_kajiura\\_fb1999.pdf](http://www.soest.hawaii.edu/pfrp/reprints/holland_kleiber_kajiura_fb1999.pdf)

Hyslop EJ (1980) Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *Journal of fish biology*, 17(4), 411-429. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1980.tb02775.x>

ICCAT (2019) Report of the 2019 ICCAT yellowfin tuna Stock Assessment Meeting (Grand-Bassam, Cote d'Ivoire, 8-16 July 2019). Disponível em: [https://www.iccat.int/Documents/SCRS/DetRep/YFT\\_SA\\_ENG.pdf](https://www.iccat.int/Documents/SCRS/DetRep/YFT_SA_ENG.pdf)

Itano DG, Holland KN (2000) Movement and vulnerability of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in relation to FADs and natural aggregation points. *Aquatic Living Resources*, 13(4), 213-223. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(00\)01062-7](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(00)01062-7)

Jiang RJ, Yang F, Chen F, Yin R, Liu MZ, Zhu WB, Guo A, Liu LW (2022) Assessing trophic interactions among three tuna species in the Solomon Islands based on stomach contents and stable isotopes. *Frontiers in Marine Science*, 9:961990. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.961990>

Layman CA, Araujo MS, Boucek R, Hammerschlag-Peyer CM, Harrison E, Jud ZR, Bearhop S (2012) Applying stable isotopes to examine food-web structure: an overview of analytical tools. *Biological reviews*, 87(3), 545-562. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00208.x>

Le-Alvarado M, Romo-Curiel AE, Sosa-Nishizaki, O Hernandez-Sanchez, O Barbero, L Herzka SZ (2021) Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) foraging habitat and trophic position in the Gulf of Mexico based on intrinsic isotope tracers. *PLoS ONE* 16(2): e0246082. [https:// 10.1371/journal.pone.0246082](https://10.1371/journal.pone.0246082)

Lessa RP, Mafalda POJR, Advíncula R, Lucchesi RB, Bezerra JL, Vaske TJR, Hellebrandt DS (1999) Distribution and abundance of ichthyoneuston at seamounts and

islands off north-eastern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research* 47(2-3), 133-146

Lima AR, Barletta M, Costa MF (2016) Seasonal-dial shifts of ichthyoplankton assemblages and plastic debris around an equatorial Atlantic archipelago. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 56. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00056>

Logan JM, Pethybridge H, Lorrain A, Somes CJ, Allain V, Bodin N, Young J (2020) Global patterns and inferences of tuna movements and trophodynamics from stable isotope analysis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 175, 104775. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104775>

Lucena FM, Vaske T, Ellis JR, O'brien CM (2000) Seasonal variation in the diets of bluefish, *Pomatomus saltatrix* (Pomatomidae) and striped weakfish, *Cynoscion guatucupa* (Sciaenidae) in southern Brazil: implications of food partitioning. *Environmental Biology of fishes*, 57(4), 423-434. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007604424423>

Madigan DJ, Carlisle AB, Dewar H, Snodgrass OE, Litvin SY, Micheli F, Block BA (2012) Stable isotope analysis challenges wasp-waist food web assumptions in an upwelling pelagic ecosystem. *Scientific reports*, 2(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/srep00654>

Mancini PL, Bugoni L (2014) Resources partitioning by seabirds and their relationship with other consumers at and around a small tropical archipelago. *ICES Journal of Marine Science*, 71: 2599–2607. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu105>

Martins K, Pelage L, Justino AK, Frédou FL, Júnior TV, Le Loc'h F, Travassos P (2021) Assessing trophic interactions between pelagic predatory fish by gut content and stable isotopes analysis around Fernando de Noronha Archipelago (Brazil), Equatorial West Atlantic. *Journal of Fish Biology*, 99(5), 1576-1590. <https://doi.org/10.1111/jfb.14863>

Maldeniya R (1996). Food consumption of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in Sri Lankan waters. *Environmental biology of fishes*, 47, 101-107. <https://doi.org/10.1007/BF00002384>

Martínez-Rincón RO, Acosta-Pachón TA (2022) Effect of environmental factors, fish size, and baseline on carbon and nitrogen stable isotope variability in *Thunnus alalunga*, *T. albacares*, and *T. obesus* in the Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 203, 102786. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102786>

Ménard F, Labrune C, Shin YJ, Asine AS, Bard FX (2006) Opportunistic predation in tuna: a size-based approach. *Marine Ecology Progress Series*, 323, 223-231. <https://doi.org/10.3354/meps323223>

Ménard F, Lorrain A, Potier M, Marsac F (2007) Isotopic evidence of distinct feeding ecologies and movement patterns in two migratory predators (yellowfin tuna and swordfish) of the western Indian Ocean. *Marine Biology*, 153(2), 141-152. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0789-7>

Monteiro A, Vaske T, Lessa RP, El-Deir ACA (1998) Exocoetidae (Beloniformes) off Northeastern Brasil. *Cybium*, 22:395–403

Niella YV, Hazin FHV, Afonso AS (2017) Detecting Multispecific Patterns in the Catch Composition of a Fisheries-Independent Longline Survey, *Marine and Coastal Fisheries*, 9:1, 388-395, [https://doi: 10.1080/19425120.2017.1347115](https://doi.org/10.1080/19425120.2017.1347115)

Niella YV, Butcher P, Holmes B, Barnett A, Harcourt R (2022) Forecasting intraspecific changes in distribution of a wide-ranging marine predator under climate change. *Oecologia*, 1-14. [https://doi: 10.1007/s00442-021-05075-7](https://doi.org/10.1007/s00442-021-05075-7)

Nielsen JM, Clare EL, Hayden B, Brett MT, Kratina P (2018) Diet tracing in ecology: Method comparison and selection. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(2), 278-291. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12869>

Nimit K, Masuluri NK, Berger AM, Bright RP, Prakash S, Varghese SP (2020) Oceanographic preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in warm stratified oceans: A remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing*, 41(15), 5785-5805. [https:// doi/full/10.1080/01431161.2019.1707903](https://doi/full/10.1080/01431161.2019.1707903)

Olson RJ, Popp BN, Graham BS, López-Ibarra GA, Galván-Magaña F, Lennert-Cody CE, Fry B (2010) Food-web inferences of stable isotope spatial patterns in copepods and yellowfin tuna in the pelagic eastern Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 86(1-2), 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.04.026>

Salvetat J, Bez N, Habasque J, Lebourges-Dhaussy A, Lopes C, Roudaut G, Bertrand A (2022) Comprehensive spatial distribution of tropical fish assemblages from multifrequency acoustics and video fulfils the island mass effect framework. *Scientific Reports*, 12(1), 1-24. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-12409-9>

Santos Guerra A (1977) Las pesquerías de túnidos en Canarias durante 1975. *Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 6(2): 437-438

Serafini TZ, de França GB, Andriguetto-Filho JM (2010) Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(3), 281-301. <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340130003.pdf>

Silva BJ, Gaspar FL, Tyaquicã P, Lefèvre N, Montes MJF (2019) Carbon chemistry variability around a tropical archipelago. *Marine and Freshwater Research*, 70(6), 767-780. <https://doi.org/10.1071/MF18011>

Schaefer KM, Fuller DW, Aldana G (2014) Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in waters surrounding the Revillagigedo Islands Archipelago Biosphere Reserve, Mexico. *Fisheries Oceanography*, 23(1), 65-82. <https://doi.org/10.1111/fog.12047>

Stock BC, Jackson AL, Ward EJ, Parnell AC, Phillips DL, Semmens BX (2018) Analysing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *PeerJ*, 6, e5096. <https://doi.org/10.7717/peerj.5096>

Parnell AC, Inger R, Bearhop S, Jackson AL (2010) Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PloS one*, 5(3), e9672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672>

Pecoraro C, Zudaire I, Bodin N, Murua H, Taconet P, Díaz-Jaimes P, Chassot E (2017) Putting all the pieces together: integrating current knowledge of the biology, ecology, fisheries status, stock structure and management of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27(4), 811-841. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9460-z>

Peterson BJ, Fry B (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual review of ecology and systematics*, 293-320

Pereira JG (1986) Composition spécifique des bancs de thonidés pêchés à la senne, aux Açores. *Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 25(1): 395-400

Pereira AA (2007) Comportamento da albacora laje *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Dissertation (master). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2007

Pethybridge H, Choy CA, Logan JM, Allain V, Lorrain A, Bodin N, Olson RJ (2018) A global meta-analysis of marine predator nitrogen stable isotopes: Relationships between trophic structure and environmental conditions. *Global Ecology and Biogeography*, 27(9), 1043-1055. <https://doi.org/10.1111/geb.12763>

Phillips DL, Newsome SD, Gregg JW (2005) Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods. *Oecologia*, 144, 520-527. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1816-8>

Phillips DL, Inger R, Bearhop S, Jackson AL, Moore JW, Parnell AC, Ward EJ (2014) Best practices for use of stable isotope mixing models in food-web studies. *Canadian Journal of Zoology*, 92(10), 823-835. <https://doi.org/10.1139/cjz-2014-0127>

Post DM (2002) Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3), 703-718. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0703:USITET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2)

Rohit P, Rao GS, Ram Mohan K (2010) Feeding strategies and diet composition of yellowfin tuna *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) caught along Andhra Pradesh, east coast of India. *Indian Journal of Fisheries*, 57(4), 13-19. <http://eprints.cmfri.org.in/id/eprint/7813>

Travassos P, Hazin FHV, Zaglaglia JR, Advíncula R, Schober J (1999) Thermohaline structure around seamounts and islands off North-Eastern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2/3), 211-222.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

Vaske Jr T, Castello JP (1998) Stomach contents of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, during winter and spring in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Biologia*, 58, 639-647. <https://doi.org/10.1590/S0034-71081998000400011>

Vaske T, Jr Vooren CM, Lessa RP (2003) Feeding strategy of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), and wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca*, 29: 173–181

Vaske Jr T, Lessa RPT, Ribeiro ABC, Nóbrega MF, Pereira ADA, Andrade CDP (2008) A pesca comercial de peixes pelágicos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil. *Tropical Oceanography* 36, 47-54

Weng JS, Lee MA, Liu KM, Hsu MS, Hung MK, Wu LJ (2015) Feeding ecology of juvenile yellowfin tuna from waters southwest of Taiwan inferred from stomach contents and stable isotope analysis. *Marine and Coastal Fisheries*, 7, 537–548. <https://doi/full/10.1080/19425120.2015.1094157>

Wood SN (2006) *Generalised additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC

White JW, Samhuri JF (2011) Oceanographic coupling across three trophic levels shapes source-sink dynamics in marine metacommunities. *Oikos* 120:1151–1164. <https://doi/full/10.1111/j.1600-0706.2010.19226.x>

Wright SR, Righton D, Naulaerts J, Schallert RJ, Bendall V, Griffiths C, Collins MA (2021) Fidelity of yellowfin tuna to seamount and island foraging grounds in the central South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 172, 103513. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103513>

Zavala-Camin LA (1978) Algunos aspectos sobre la estructura poblacional del rabil (*Thunnus albacares*) en el Sudeste y Sur del Brasil (1969-1977), con presentación de la hipótesis de la migración semestral. *Boletim do Instituto de Pesca*, 5(1): 1-50. <https://institutodepesca.org/index.php/bip/article/view/29>

Zeineddine GC, Barrella W, Rotundo M, Ramires M (2022) Fernando de Noronha (state of Pernambuco) fishermen's local ecological knowledge regarding the fish species used as bait. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, 57(2), 230–238. <https://doi.org/10.5327/Z217694781142>

## **Statements and Declarations**

### **Funding**

This research received financial supported by the Project of Technical and Scientific Support for the Development of the Brazilian Tuna Fishery (PROTUNA), funding through the Call MCTI/MPA/CNPq N° 22/2015 – Management of the Brazilian Marine Fisheries. The main author received a PhD level scholarship from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

### **Competing Interests**

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### **Author Contributions**

Conceptualization, writing and data analyses: Karla Martins, Yuri Niella, and Paulo Travassos. Data acquisition, review, and editing: all authors.

### **Data Availability**

Supervision, Principal Project administration, and Funding acquisition: Paulo Travassos (PROTUNA Project). This study was developed using data generated by three projects: PROTUNA, Acoustics along the BRAZILIAN COaSt (ABRAÇOS) and Ecology, Fisheries and Genotoxicity of Fishes in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago. These data are restricted to members of these projects and has been made available for the purposes of writing and publishing this article.

### **Ethics approval**

Sampling was approved and complied with the laws, guidelines, and policies on animal welfare of the Ethics Committee on the use of animals of the Federal Rural University of Pernambuco CEUA-UFRPE (Process numbers: 23082.008290/2018-18; Sisbio 47270-5), and the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation through the Biodiversity Authorization and Information System (Process number 62915-6).

## Cap. II

### Marcadores Artificiais: Dinâmica espaço-temporal

---

#### Artigo 2:

*Movements and habitat use of yellowfin tuna in the Southwest Atlantic with electronic pop-up satellite archival tags*



Imagem: crfishingcharters

## **Movements and habitat use of yellowfin tuna in the Southwest Atlantic with electronic pop-up satellite archival tags**

Karla Martins

Laboratório de Ecologia Marinha, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

Segundo manuscrito da tese, a ser submetido em 2025

### **RESUMO**

A albacora laje (*Thunnus albacares*) é uma espécie pelágica de notória mobilidade, conhecida por sua natação eficiente e ampla distribuição circumglobal em mares tropicais e subtropicais, exceto o Mar Mediterrâneo. O Oceano Atlântico Sul apresenta ambientes especiais para a espécie, como os arquipélagos de Fernando de Noronha e São Pedro e São Paulo, bem como as áreas offshore de Cabo Frio (Rio de Janeiro), onde a espécie forma agregações que sustentam pescarias industriais e artesanais. Entretanto, existe uma lacuna de conhecimento, quanto ao detalhamento dos deslocamentos da albacora laje particularmente em regiões isoladas que fornecem características ecológicas diversas e únicas, permitindo significativa agregação da espécie no entorno destes locais. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa consistiu em fornecer informações e ampliar a compreensão da dinâmica espaço-temporal da albacora laje no Oceano Atlântico Sul; incluindo aspectos comportamentais de movimentação vertical e horizontal e uso do habitat oceânico pelo predador utilizando marcas por satélite. Foram marcados 18 exemplares de albacora laje com marcas miniPAT, das quais oito permaneceram presas por <2 dias ou não reportaram dados. As dez marcas restantes foram aplicadas em todas as análises. O comprimento furcal dos exemplares variou de 84 a 133 cm (CF). Os padrões de movimentação horizontal demonstraram que os indivíduos no ASPSP exibiram uma maior dispersão espacial, enquanto os peixes marcados em AFN e RJ apresentaram comportamento mais restrito e uma maior fidelidade ao habitat. A análise da movimentação vertical revelou que a albacora laje utiliza a coluna d'água de forma diferenciada ao longo do ciclo circadiano. Durante o dia, os indivíduos permaneceram predominantemente na camada epipelágica, onde as temperaturas se mantêm em 20–30°C, indicando preferência por águas mais quentes e bem oxigenadas. Durante a noite, foram observados mergulhos mais profundos (>200 metros). Os resultados aqui obtidos lançam luz sobre as capacidades fisiológicas da albacora laje em termos de profundidade e temperatura alcançadas pela espécie.

**Palavras-chave:** Telemetria satélite, miniPAT, Deslocamento circadiano, Ilhas oceânicas

## INTRODUÇÃO

A albacora laje (*Thunnus albacares*) é uma espécie pelágica de notória mobilidade, conhecida por sua natação eficiente e ampla distribuição circumglobal em mares tropicais e subtropicais, exceto o Mar Mediterrâneo (Collete e Nauen, 1983). Como uma das 10 principais espécies do mundo em peso de desembarque (FAO, 2022), este predador representa um alvo significativo na pesca global, com uma captura média anual de 1,25 milhão de toneladas na última década (Price et al., 2022). A população de albacora laje no Oceano Atlântico é administrada como um único estoque (Bard e Scott, 1992; Bard e Hervé, 1994; Fonteneau, 1994), este de grande importância para a estabilidade econômica e segurança alimentar de várias comunidades costeiras, particularmente em regiões em desenvolvimento e ambientes insulares/remotos (FAO, 2022; Wright et al., 2021).

Embora os padrões de distribuição e uso do habitat da albacora laje sejam fundamentais para determinar a disponibilidade da espécie nas áreas de pesca, relativamente poucos estudos forneceram observações detalhadas acerca dos seus movimentos e comportamento no Oceano Atlântico Sul. Entender a distribuição espacial e as preferências de habitat da albacora laje é essencial para um gerenciamento eficaz, permitindo insights sobre sua ecologia e vulnerabilidades potenciais a mudanças ambientais (Rohner et al., 2023). Globalmente, a albacora laje exibe um comportamento migratório extenso, normalmente permanecendo acima da termoclina, mas não está confinado à camada mista e apresentando padrões de mergulho variáveis (Block et al., 1997; Brill et al., 1999; Weng et al., 2009). Ocasionalmente, esses atuns mergulham a profundidades superiores a 1.000 metros, encontrando temperaturas mais frias (Dagorn et al., 2006; Schaefer et al., 2007), embora estudos também tenham relatado um grau de residência regional após a marcação, sugerindo fidelidade ao local em algumas áreas (Wright et al., 2015; Sibert e Hampton, 2003; Robert et al., 2012).

A albacora laje é frequentemente encontrada próxima a ilhas, montes submarinos, plataformas de petróleo e dispositivos de agregação de peixes (FADs), com associações possivelmente impulsionadas por águas ricas em nutrientes e disponibilidade de presas nesses ambientes (Dagorn et al., 2007; Pitcher et al., 2007; Schaefer et al., 2013; Wright et al., 2021). O Oceano Atlântico Sul apresenta vários ambientes especiais para a espécie, como os arquipélagos de Fernando de Noronha e São Pedro e São Paulo, bem como as

áreas offshore de Cabo Frio (Rio de Janeiro), onde a espécie forma agregações que sustentam pescarias industriais e artesanais.

As características de movimentação e preferências de habitat da albacora laje podem variar regionalmente, influenciadas por fatores ambientais como temperatura e disponibilidade de oxigênio. No Oceano Pacífico, onde baixos níveis de oxigênio criam habitats comprimidos, o oxigênio limita significativamente a distribuição vertical (Garçon et al., 2019; Rohner et al., 2023). Em contraste, nos oceanos Índico e Atlântico a albacora laje é normalmente encontrada em águas que variam de 20 °C a 30 °C (Weng et al., 2009; Nimit et al., 2020). No Atlântico Sul, padrões de movimento foram parcialmente documentados por meio de marcação eletrônica e convencional na região do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Andrade Pereira, 2007; Monteiro, 2018). No entanto, existe uma lacuna de conhecimento, quanto ao detalhamento dos deslocamentos da albacora laje particularmente em regiões isoladas que fornecem características ecológicas diversas e únicas, permitindo significativa agregação da espécie no entorno destes locais.

A região oceânica do Atlântico Sul apresenta características ambientais que impactam a ecologia e a dinâmica das espécies pelágicas. As temperaturas da superfície do mar variam de acordo com a latitude, com águas quentes em áreas tropicais e subtropicais, e mais frias em águas profundas, criando um habitat diverso para espécies migratórias (Garçon et al., 2019). As correntes oceânicas desempenham um papel crucial no transporte de nutrientes e na formação de zonas de convergência, especialmente na Confluência Brasil-Malvinas, onde águas tropicais quentes encontram águas subantárticas frias, gerando uma zona rica em nutrientes e, conseqüentemente, alta produtividade biológica (Bianchi et al., 2012; Calil et al., 2021). As áreas de ressurgência aumentam a produtividade primária e fornecem recursos alimentares para uma ampla gama de predadores marinhos (Valentin et al., 2013). Esses fatores criam condições ideais para a pesca de espécies economicamente importantes, exploradas tanto por frotas industriais quanto por pescadores artesanais, contribuindo para a economia e segurança alimentar (FAO, 2022).

Através da telemetria por satélite, este estudo marcou exemplares de albacora laje em três regiões do Oceano Atlântico Sul: Arquipélago de Fernando de Noronha (FNA), Arquipélago de São Pedro e São Paulo (SPSPA) e Cabo Frio (RJ). Esta pesquisa tem o objetivo de fornecer informações e ampliar a compreensão da dinâmica espaço-temporal

da albacora laje no Oceano Atlântico Sul; incluindo aspectos comportamentais de movimentação vertical e horizontal e uso do habitat oceânico pelo predador.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### *Áreas de estudo*

Os locais de estudo incluíram duas unidades de conservação marinha, o Arquipélago de Fernando de Noronha (FNA) e Arquipélago de São Pedro e São Paulo (SPSPA); além da região oceânica de Cabo Frio (RJ) (Figura 1).

### *Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) - Arquipélago de São Pedro São Paulo (ASPSP)*

Aproximadamente 340 km da costa (3,86° S, 32,42° W), o AFN é composto por 21 ilhas e ilhotas (Serafini et al., 2010). A ilha principal tem um relevo acentuado e dois lados distintos e é influenciada pela corrente equatorial sul (Serafini et al., 2010). O ASPSP está localizado a 1000 km da costa e é formado por um pequeno grupo de ilhotas rochosas (0,92° N, 29,34° W). Este arquipélago é diretamente influenciado pela corrente equatorial sul que flui na superfície e pela contracorrente equatorial submersa que flui ao longo da camada subsuperficial (Travassos et al., 1999). O posicionamento geográfico na Dorsal Atlântica entre os continentes africano e sul-americano é responsável por uma alta diversidade de vida marinha, que usa essa região para descanso, alimentação e reprodução (Campos et al., 2015), sendo classificada como EBSA (área ecologicamente ou biologicamente significativa) (CBD, 2014). Processos de ressurgência local em pequena escala como consequência do efeito ilha são responsáveis por aumentos significativos na produtividade nas regiões destes arquipélagos (Silva et al., 2019; Travassos et al., 1999).

### *Cabo Frio (RJ)*

A região de Cabo Frio (RJ) compreende águas costeiras e oceânicas na costa sudeste brasileira (de 22,52 a 23,17° S, 39,97 a 41,03° W), uma região localizada dentro da Bacia de Campos, uma importante área de produção de petróleo (Niella et al., 2018). Esta área é caracterizada pelo fenômeno de ressurgência, e as águas costeiras e tropicais da Corrente Brasileira constituem as massas de água deste sistema (Valentin, 2001). Este notável sistema de ressurgência costeira, é considerado um dos mais intensos do Atlântico Sul e exerce grande influência na ecologia local, proporcionando habitats ricos e atraindo

espécies pelágicas e demersais, incluindo várias espécies de peixes de valor comercial (Coelho-Souza et al., 2012). Este ambiente produtivo sustenta a pesca local, fundamental para a economia regional fornecendo fontes de sustento para as comunidades pesqueiras, além de sustentar a pesca industrial que explora espécies de alto valor econômico (Valentin, 2001).

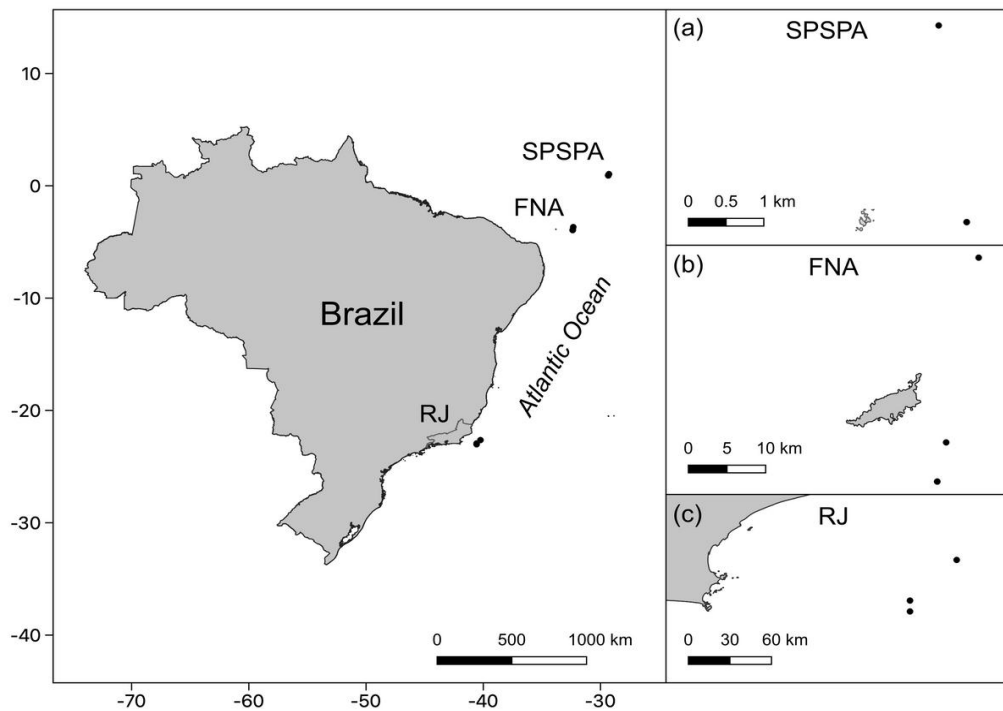


Figura 1: Localização das três áreas de estudo usadas para marcação da albacora laje no Oceano Atlântico Sul: a) SPSPA (Arquipélago de São Pedro e São Paulo), b) FNA (Arquipélago Fernando de Noronha), c) RJ (região de Cabo Frio no Rio de Janeiro).

### *Análises*

As posições geográficas estimadas (geolocalização) para as marcas eletrônicas foram calculadas aplicando o pacote HMMocean para estimar perfis de probabilidade para cada peixe marcado. A abordagem HMM bayesiana estima os movimentos, comportamento e residência dos animais a partir de dados de movimento incertos e temporalmente correlacionados. Além de permitir a estimativa de estados comportamentais, ela fornece informações sobre a distribuição posterior de estados modelados (Pedersen et al., 2011). O modelo permite um parâmetro inicial definido pelo usuário para a velocidade do animal e, com base no desempenho de natação da espécie, a velocidade máxima de nado foi definida em 3,6 km/s. Todas as análises posteriores foram conduzidas no ambiente de computação R versão 4.2.2 (R Core Team, 2022).

Para examinar os movimentos horizontais e o uso do habitat, incluímos as localizações geográficas dos peixes marcados e calculamos as Distribuições de Utilização de Kernel (KUD). Com base nos pontos de geolocalização obtidos, estimamos a utilização do habitat aplicando a análise KUD (95%), que indica a maior probabilidade de espaço utilizado pela espécie em um período específico. Para estimar as distribuições de densidade de kernel e calcular a área do KUD, aplicamos a função kernelUD no pacote adehabitatHR e visualizamos em R. Para analisar o padrão de movimento da albacora laje nas três áreas de estudo, medimos as distâncias percorridas pelos indivíduos marcados e testamos se essas distâncias variavam significativamente entre as regiões. Em relação às distâncias percorridas, calculamos as distâncias para taxas de deslocamento diárias e as distâncias totais percorridas em relação ao ponto de marcação. Para verificar possíveis diferenças significativas na frequência de distâncias percorridas entre as regiões, realizamos uma Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey para identificar quais regiões e intervalos de distância apresentam diferenças significativas.

Para processar a atividade vertical em relação aos dados de profundidade e temperatura, observamos os perfis de distribuição de profundidade e amplitude de temperatura por máximo e mínimo por dia. O período noturno e diurno foram determinados usando curvas de luminosidade transmitida e registradas pela marcação. Para verificar diferenças significativas entre regiões e entre períodos (dia/noite) para as variáveis de temperatura mínima e máxima, e profundidade mínima e máxima, realizamos um teste ANOVA. As análises foram conduzidas por peixe e os padrões em movimentos verticais foram examinados dentro do contexto da região de marcação.

## **RESULTADOS**

### *Marcação, desempenho das marcas e aquisição de dados*

Foram marcados 18 exemplares de albacora laje com marcas miniPAT (pop up satellite archival tags – Wildlife Computers) durante os anos de 2015 e 2018. Do total de marcas inseridas, oito permaneceram presas por <2 dias ou não relataram dados, e foram removidas das análises. As dez marcas restantes foram aplicadas em todas as análises. O comprimento furcal dos exemplares variou de 84 a 133 cm (CF), e dos dez indivíduos marcados, quatro foram classificados como imaturos e seis como maduros, com base na classificação proposta por Diaha et al., ( $L_{50} = 99$  cm CF).

Todos os atuns marcados em SPSP, FN e RJ apresentaram liberação prematura das marcas miniPAT, destacando-se previamente ao período de monitoramento estabelecido de 180 dias (Tabela 1). Os períodos de retenção das marcas nos peixes (dias em liberdade) variaram de 1 a 17 dias. Destes peixes, uma marca não relatou seus dados (FN), cinco foram liberados em menos de seis dias, três aparentemente tiveram uma falha no sensor de temperatura.

Tabela 1: Informações gerais sobre a marcação eletrônica da albacora laje utilizando miniPAT no Oceano Atlântico Sul.

	YFT	ID	Data da marcação	CF (cm)	MARCAÇÃO		SOLTURA		Dias de liberdade
					Lat.	Long.	Lat.	Long.	
ASPSP	Tuna 1	143819	26/04/2015	126	0.9166	-2.933	0.9040	2.933	17
	Tuna 2	143820	26/04/2015	133	0.9166	-2.933	19.540	-2.918	3
	Tuna 3	143821	26/04/2015	111	0.9166	-2.933	21.720	-2.977	2
	Tuna 4	163282	16/05/2017	98	1.035	-2.928	0.9701	-3.079	11
AFN	Tuna 5	163236	16/05/2017	129	-1.560	-3.230	-29.316	-3.300	7
	Tuna 6	163254	25/04/2018	84	-3.948	-3.237	-36.611	-3.429	1
	Tuna 7	163242	25/04/2018	89	-3.948	-3.237	-37.924	-3.396	1
	Tuna 8	163237	26/04/2018	93	-3.900	-3.236	-40.147	-3.441	7
RJ	Tuna 9	163275	08/04/2017	120	-22.640	-4.024	-239.489	-4.235	1
	Tuna 10	163262	25/05/2017	116	-22.940	-4.057	-241.106	-4.107	16

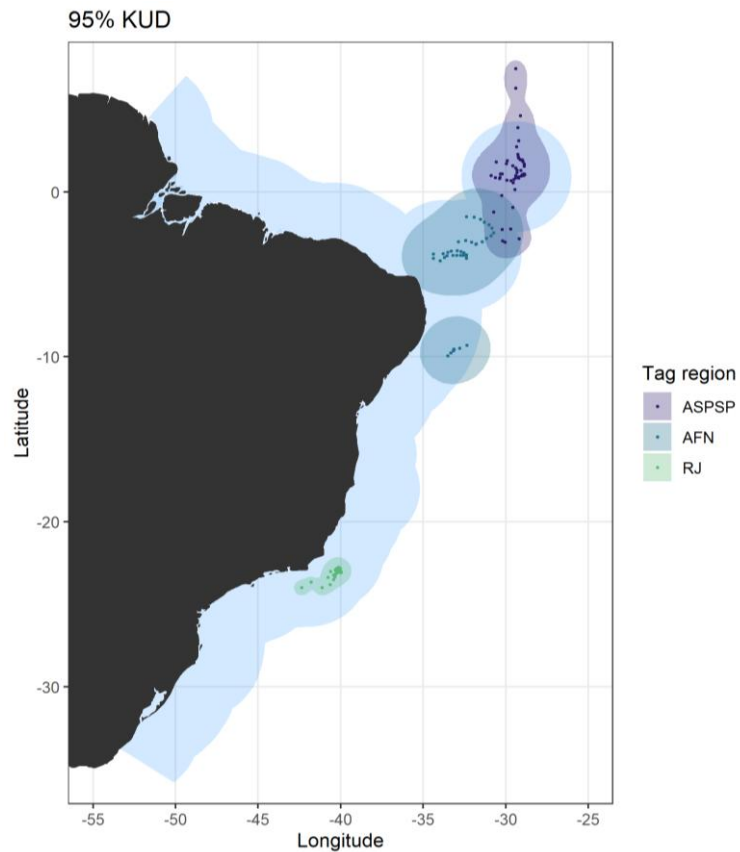
\*Abreviação: ID – número do PTT da marca; CF – comprimento furcal.

### *Movimentação horizontal*

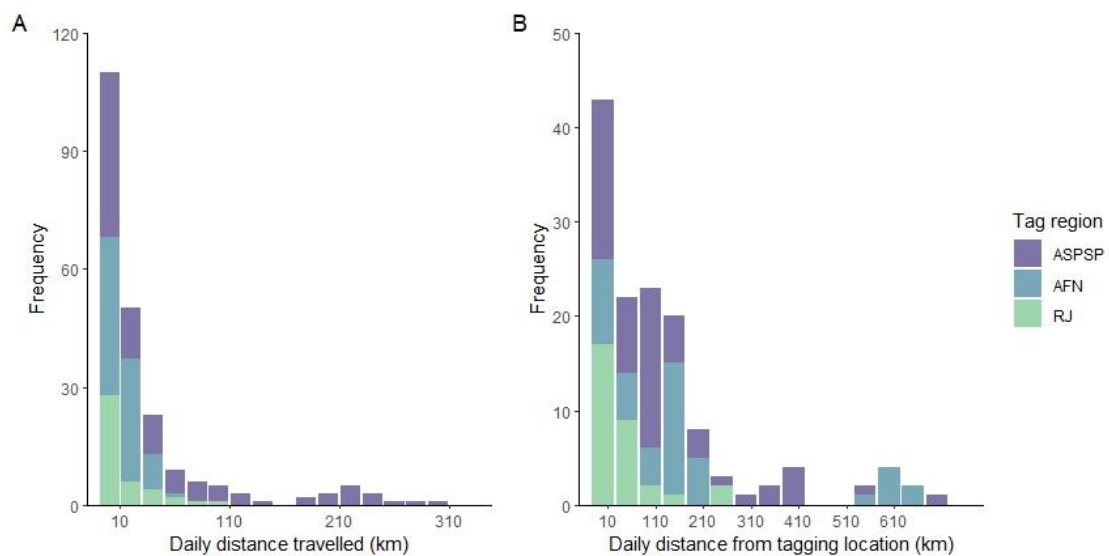
Para examinar as probabilidades de distribuição, uma análise de Kernel de Distribuição de Utilização (KUD – 95%) de geolocalizações foi gerado e revelou as áreas centrais de utilização do espaço ao longo do período de marcação (Figura 2). A análise de KUD (95%) dos atuns marcados cobriu principalmente as áreas ao redor de seus locais de marcação e uma aparente ausência de movimentos extensos durante o experimento, e as áreas utilizadas não se sobrepõem completamente entre as regiões. O KUD também mostrou padrões espaciais distintos de uso do habitat, destacando as áreas com maior probabilidade de ocorrência, de acordo com as regiões de marcação. Os indivíduos marcados na região do ASPSP (roxo) mostraram uma área de uso mais ampla localizada ao norte. Na região de FN (azul), as marcações mostram uma concentração de uso um pouco mais ao sul em relação ao SPSP, cobrindo também uma área no nordeste do Brasil. No RJ (verde), observamos uma área de uso menor e mais local/restrita em comparação às regiões SPSP e FN. Não registramos nenhum movimento direcional de longo alcance para longe de nenhuma das áreas de estudo durante a duração do rastreamento, embora um indivíduo (SPSP) tenha se destacado em uma trajetória que se dirigiu para o norte.

Em relação às distâncias diárias percorridas pelos atuns (Figura 3A), em geral, os indivíduos marcados na região de SPSP apresentaram maior frequência de movimentos curtos, sendo as distâncias diárias em torno de 10 km as mais comuns. No entanto, em comparação com as outras regiões, os peixes de SPSP são mais propensos a percorrer distâncias maiores, com alguns registrando movimentos diários de até 310 km. Em FN, os peixes apresentaram um padrão de movimento semelhante ao de SPSP, pois a maioria dos exemplares tendeu a percorrer distâncias curtas diariamente, com a frequência dos movimentos diminuindo acentuadamente à medida que a distância aumenta. No entanto, os atuns marcados em FN apresentaram menor frequência de grandes movimentos em comparação com SPSP. Os atuns marcados na região do RJ apresentam um comportamento diário com movimentos curtos, em torno de 10 km. Em comparação com SPSP e FN, os indivíduos do RJ apresentam uma frequência ainda menor de grandes movimentos diários, sugerindo um comportamento menos exploratório em termos de distância.

Em relação à frequência da distância total percorrida a partir do local de marcação (Figura 3B), as albacoras lajes marcadas em SPSP tenderam a se afastar mais do ponto de marcação inicial, com uma dispersão que pode chegar a 610 km. Esse padrão pode indicar uma exploração de áreas mais amplas ao redor do ponto de marcação, sugerindo que a espécie usa um habitat mais extenso nessa localidade. Em FN, os peixes mostraram um padrão de dispersão moderado, com a maioria dos indivíduos permanecendo a menos de 210 km do ponto de marcação. Embora haja alguma exploração de áreas próximas, esses peixes parecem ter uma afinidade maior com o local de marcação inicial, permanecendo dentro de um raio relativamente próximo. No RJ, os indivíduos permaneceram próximos ao local de marcação inicial, movendo-se no máximo 110 km de distância.



**Figura 2:** Análise de Kernel dos exemplares de albacora laje marcados com telemetria satélite (miniPAT) mostrando com 95% de confiança as distribuições dos peixes nas áreas de estudo: ASPSP em roxo, AFN em azul e RJ em verde.



**Figura 3:** (A) Frequência da distância diária percorrida; (B) Frequência da distância total percorrida a partir do local de marcação.

Foi aplicado um teste ANOVA para verificar se havia diferença significativa entre as distâncias e regiões. Para o modelo A (Figura 3A, Tabela 2) em relação às distâncias percorridas diariamente, o valor de p demonstrou efeito significativo, indicando que há diferenças significativas entre as regiões. Para o modelo B (Figura 3B, Tabela 2), o valor de p indicou diferença significativa entre as regiões, porém com menor significância que no modelo A, sugerindo que as diferenças entre as regiões no modelo B são menos pronunciadas, embora ainda estatisticamente significativas.

Tabela 2: Sumário do teste de Tukey.

		Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
<b>A</b>	Value	1	294.1	294.14	42.59	5.68e-08 ***
	Region	2	269.7	134.84	19.52	<b>8.52e-07</b> ***
	Residuals	44	303.9	6.91		
<b>B</b>	Value	1	267.9	267.86	25.626	9.18e-06 ***
	Region	2	75.6	37.80	3.617	<b>0.0358</b> *
	Residuals	41	428.5	10.45		

#### *Uso do habitat vertical*

Em SPSP, observamos padrões de comportamento de mergulho e uso de diferentes camadas de temperatura em diferentes dias em abril e maio (Figura 4). Os dados mostram variações na profundidade alcançada por cada indivíduo, com mergulhos variando de águas rasas a profundidades de até 400 m. As temperaturas da água variaram de aproximadamente 10°C a 30°C, sugerindo que os atuns estão se movendo entre diferentes camadas térmicas, com águas mais quentes (próximas à superfície) durante o dia e águas mais frias em maiores profundidades à noite. Indivíduos como 143820 e 143821 exibiram comportamento de mergulho mais dinâmico, alternando entre águas rasas e profundas em intervalos curtos, enquanto o indivíduo 163282 passou a maior parte do tempo em águas mais profundas. As áreas sombreadas nos gráficos indicam o período noturno, durante o qual alguns indivíduos parecem reduzir sua atividade de mergulho, enquanto outros continuam explorando diferentes profundidades.

Em FN (Figura 5), os indivíduos 163236 e 163237 realizaram mergulhos profundos, atingindo profundidades entre 400 e 500 m. O indivíduo 163242 apresentou comportamento mais dinâmico, alternando entre águas rasas e profundas, com mergulhos frequentes até 400 m, e explorando uma faixa maior de temperaturas, de águas mais

quentes ( $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ) a águas mais frias ( $\sim 10^{\circ}\text{C}$ ). O indivíduo 163254 não apresentou dados significativos de atividade, limitando a interpretação de seu comportamento.

No RJ (Figura 6), o indivíduo 163262 realizou mergulhos frequentes e relativamente rasos, atingindo profundidades de até 300 metros, principalmente em águas mais quentes com temperaturas entre  $20^{\circ}\text{C}$  e  $30^{\circ}\text{C}$ , durante um período que se estendeu de maio a junho. Este padrão de mergulho foi constante tanto durante o dia quanto à noite, sugerindo um comportamento ativo e contínuo. Em contraste, o indivíduo 163275 realizou um mergulho profundo 24h após a marcação, indicando provável morte.

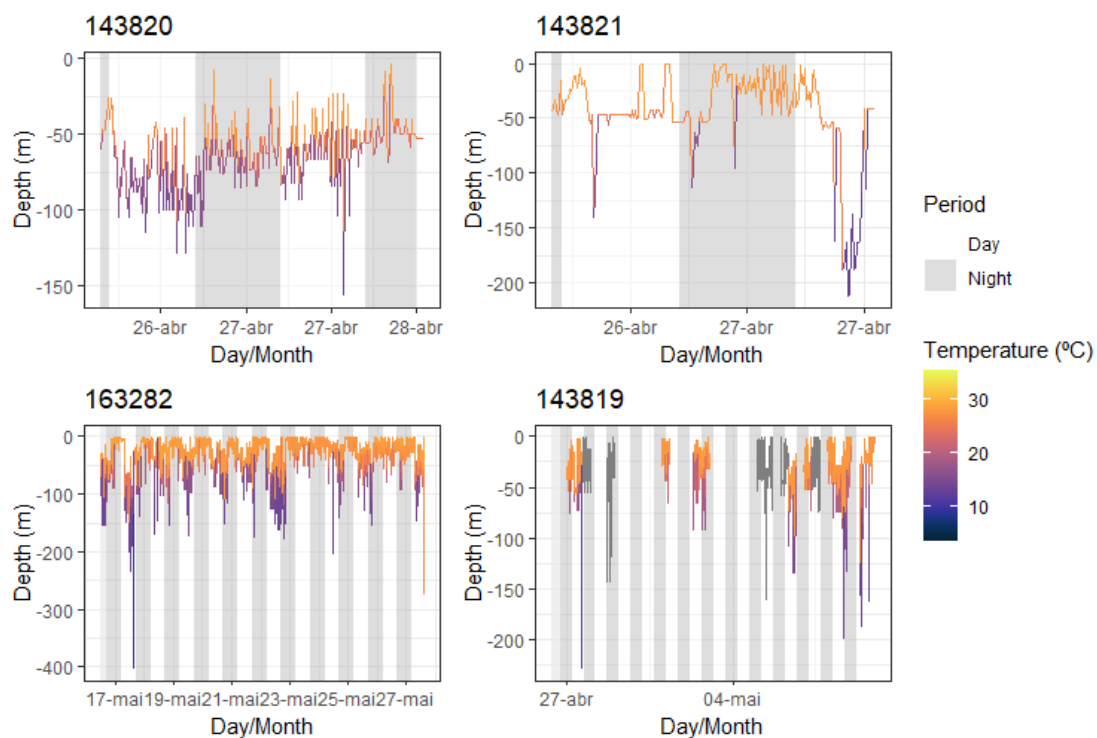


Figura 4: Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas no ASPSP. As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura.

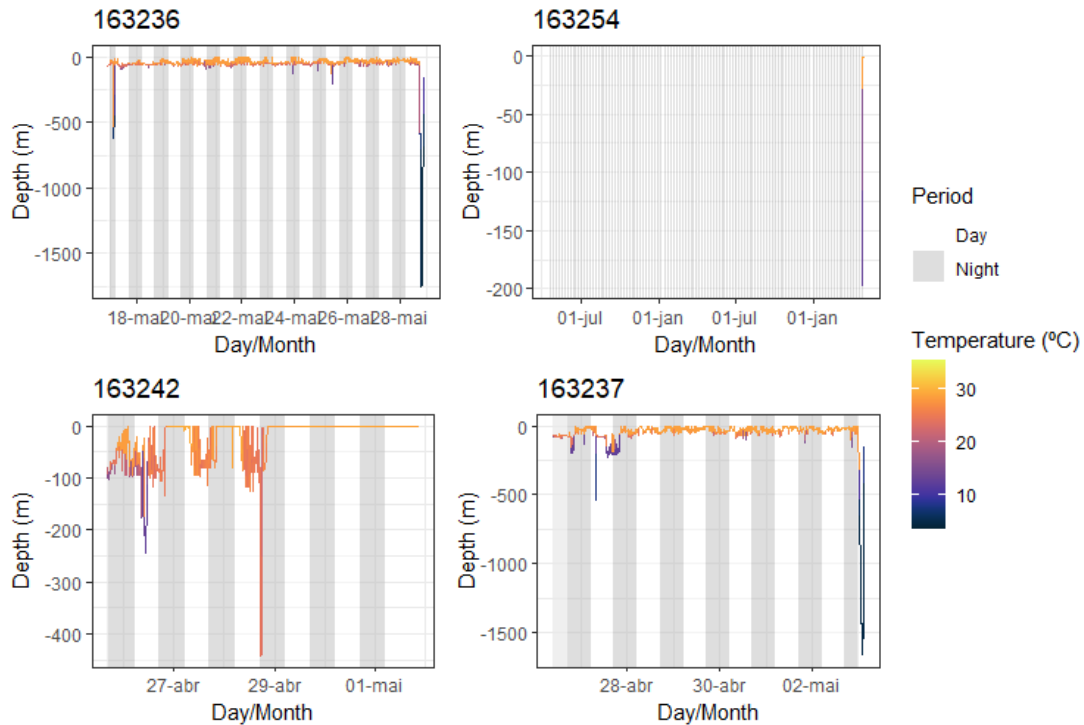


Figura 5: Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas no AFN. As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura.

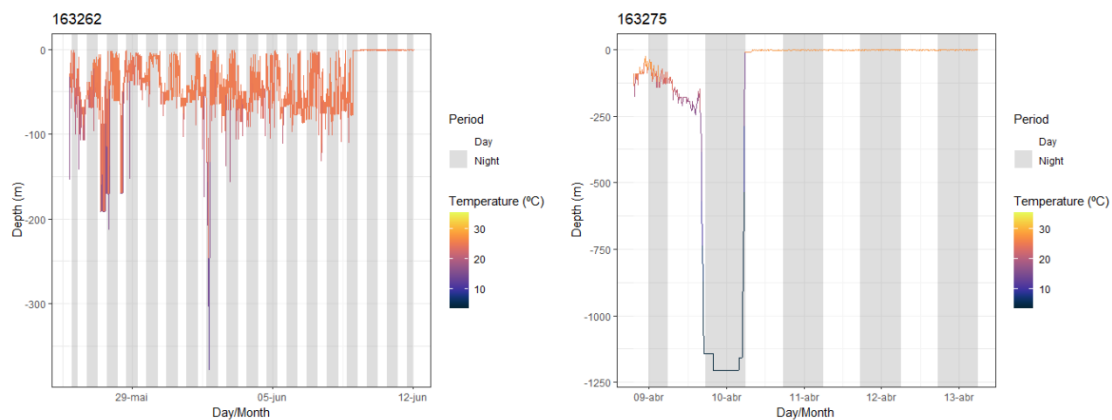


Figura 6: Séries temporais de profundidade e temperatura das albacoras laje rastreadas no RJ. As linhas verticais mostram a localização do peixe em relação à profundidade e temperatura.

Em relação à profundidade e temperatura entre as três regiões de estudo (ASPSP, AFN e RJ), observa-se que as profundidades mínimas são bastante rasas, com valores próximos à superfície tanto durante o dia quanto à noite (Figura 7). Houve variação na profundidade máxima, principalmente à noite. Na região do ASPSP, alguns indivíduos atingem profundidades de até 400m metros à noite, enquanto no RJ essa profundidade máxima é mais superficial. Em SPSP, a temperatura mínima permanece em torno de 20 a 30°C, com pouca variação entre o dia e a noite. Em FN e no RJ, as temperaturas mínimas

são um pouco menores, principalmente na RJ, onde há registros de temperaturas abaixo de 20°C. Em SPSP e FN as temperaturas máximas são altas e consistentes, próximas a 28°C, com pouca diferença entre o dia e a noite. Entretanto, no RJ há maior variação, com temperaturas máximas menores, principalmente à noite.

Aplicando o teste ANOVA, observamos que a albacora laje apresenta comportamento semelhante em relação à profundidade entre as áreas, com pouca variação na profundidade máxima e mínima. No entanto, há diferença significativa na temperatura máxima entre as áreas, sugerindo que a espécie vivencia condições térmicas distintas, principalmente com águas mais quentes em algumas regiões (como ASPSP e FN).

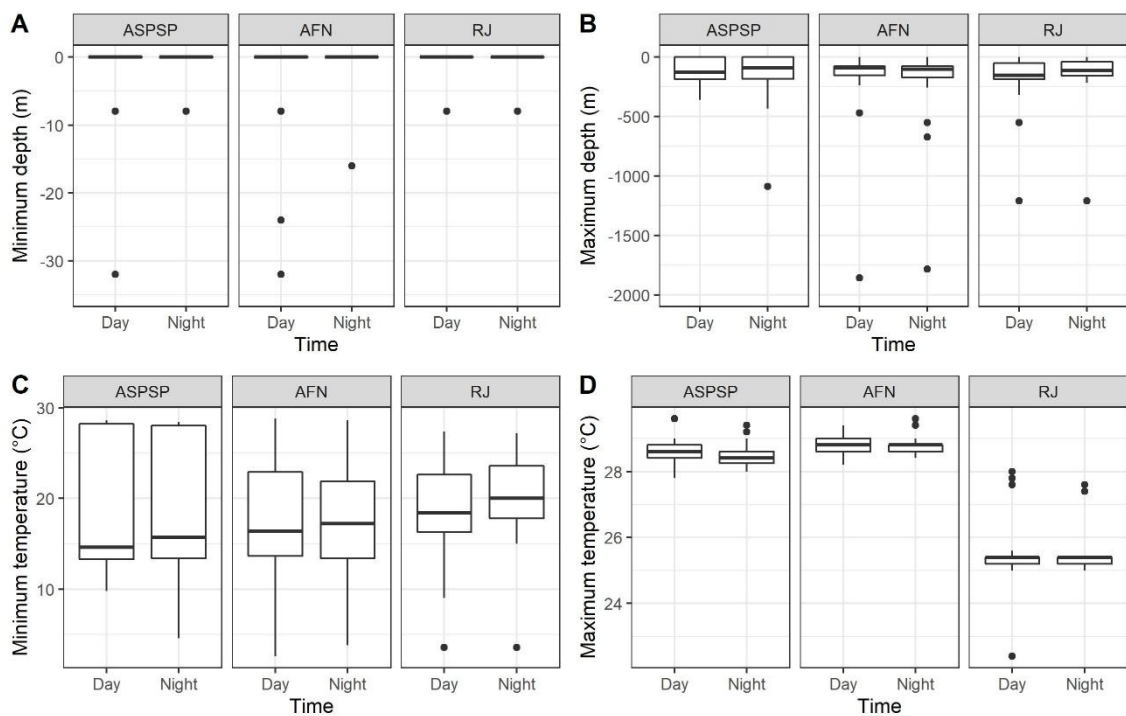


Figura 7: Padrões de uso do habitat vertical da albacora laje (*Thunnus albacares*) nas três regiões de estudo: Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) e região de Cabo Frio (RJ), diferenciados entre períodos diurno (Day) e noturno (Night). BoxPlot apresentando a distribuição dos dados para cada variável, com a mediana representada pela linha dentro da caixa, os quartis superior e inferior delimitando a caixa, e os valores extremos plotados como pontos individuais.

Tabela 3: Resultados da análise de variância (ANOVA) ao comparar as variáveis ambientais entre as três áreas de estudo (ASPSP, AFN e RJ). A tabela apresenta os graus de liberdade (Df), o valor da estatística F, e o valor de significância estatística (p-value).

Source (between areas)	Df	F	p-value
Depth max	2	0.946	0.391
Depth min	2	0.484	0.617
Temperature max	2	366.3	<0.001
Temperature min	2	0.716	0.49

## DISCUSSÃO

Tecnologias de marcação foram desenvolvidas para melhorar a compreensão do comportamento e da fisiologia dos animais marinhos em seu ambiente natural (Sibert e Nielsen, 2001). Mecanismos para monitorar o movimento dos peixes vêm ganhando espaço na pesquisa comportamental desde a década de 1960 (Schaefer et al., 1961, 2007; Brill et al., 1999; Hoolihan et al., 2014). Essas ferramentas são capazes de fornecer dados contínuos, independentes da atividade pesqueira, sobre a distribuição, movimento e o comportamento das espécies (Nimit et al., 2020). Experimentos de marcação apoiam a elucidação de processos etológicos em peixes pelágicos, permitindo melhor avaliação de estoques e gestão pesqueira (Fréon e Dagorn, 2000). A combinação de diferentes dispositivos de marcação fornecem a oportunidade de entender aspectos comportamentais de movimentação, conectividade entre regiões (marcadores convencionais) e deslocamentos verticais e horizontais (marcadores eletrônicos) (Wright et al., 2021).

Os resultados encontrados mostram que a albacora laje pode apresentar distintos padrões de movimentação horizontal nas três áreas de estudo, sugerindo que a espécie responde de forma diferencial às condições ambientais de cada região. No Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), os peixes apresentaram uma distribuição espacial mais ampla e deslocamentos diários mais longos, indicando um comportamento exploratório. A presença da Corrente Sul Equatorial pode favorecer deslocamentos amplos, ajudando a espécie a explorar diferentes áreas de forrageamento e além de possibilitar a conectividade entre habitats oceânicos (Travassos et al., 1999; Andrade et al., 2018). Por outro lado, os indivíduos marcados em Fernando de Noronha (FN) demonstraram uma dispersão menor e maior permanência na área de marcação. Essa possível permanência ao habitat pode estar relacionada à elevada biomassa de presas, à disponibilidade de refúgio e à influência de montes submarinos próximos, que atuam como hotspots ecológicos e favorecem a agregação de predadores de topo (Fonteneau et

al., 2013; Schaefer et al., 2013). O efeito ilha, pode contribuir para a retenção da albacora laje nessa região, minimizando a necessidade de grandes deslocamentos em busca de alimento por exemplo (Pitcher et al., 2007). Na região de Cabo Frio (RJ), a movimentação horizontal foi ainda mais restrita, evidenciando um comportamento mais residente. Essa restrição espacial pode estar associada à forte influência da ressurgência costeira, que promove alta produtividade primária e mantém uma oferta constante de presas na região (Valentin et al., 2013; Rohner et al., 2023). Diferentemente das áreas oceânicas abertas, onde a dispersão de presas pode induzir maiores deslocamentos, em Cabo Frio os indivíduos podem se beneficiar de um ambiente previsível, reduzindo a necessidade de exploração de grandes áreas (Coelho-Souza et al., 2012).

Os diferentes perfis de deslocamento observados sugerem que a albacora laje pode ajustar seu comportamento espacial conforme as características oceanográficas de cada ambiente. Em áreas como o ASPSP, a estratégia exploratória pode ser vantajosa para maximizar o acesso a presas. Já em regiões de maior produtividade, como Cabo Frio e Fernando de Noronha, a fidelidade ao habitat pode indicar um comportamento otimizado para minimizar gastos energéticos, priorizando a permanência em áreas ricas em recursos (Wright et al., 2021). Além disso, a ausência de deslocamentos de longa distância observada no estudo pode ser um reflexo da curta duração do monitoramento causado pela liberação prematura das marcas, mas também levanta a possibilidade de que populações locais possam apresentar algum grau de fidelidade a determinadas regiões (Wright et al., 2021). A fidelidade ao habitat já foi registrada para outras populações de *Thunnus albacares*, especialmente em regiões insulares, onde os indivíduos tendem a permanecer associados a estruturas submarinas e sistemas de ressurgência (Robert et al., 2012; Sibert & Nielsen, 2001).

A distribuição vertical da albacora laje nos três locais de estudo revelou um padrão de uso da coluna d'água diferenciado. No ASPSP, os indivíduos realizaram mergulhos mais profundos especialmente durante o dia, chegando a atingir 400 metros. Andrade-Pereira (2007) e Monteiro (2018) encontraram resultados semelhantes em um experimento com exemplares de albacora laje marcados em SPSP. Observaram uma presença mais superficial a noite, com permanência na camada homogênea; visitando águas mais frias durante o dia. Em Fernando de Noronha, os padrões de mergulho foram semelhantes aos do ASPSP, com profundidades alcançando 300 a 500 metros. A variação na amplitude dos mergulhos pode indicar um comportamento termo regulatório, onde os

indivíduos alternam entre águas superficiais mais quentes e águas profundas mais frias para otimizar o metabolismo e evitar a fadiga muscular associada à exposição prolongada a baixas temperaturas (Brill et al., 1999; Weng et al., 2009). A influência de montes submarinos na região pode favorecer a disponibilidade de presas em diferentes estratos da coluna d'água, tornando o comportamento de mergulho altamente dinâmico (Robert et al., 2012). Já em Cabo Frio, os indivíduos permaneceram em águas superficiais, com raros mergulhos abaixo dos 300 metros. A elevada produtividade da região, que concentra presas em águas rasas, reduzindo a necessidade de exploração de camadas mais profundas pode ser uma das razões para o comportamento aqui encontrado (Valentin, 2001; Coelho-Souza et al., 2012). Além disso, as águas da ressurgência apresentam temperaturas relativamente amenas, o que pode minimizar a necessidade de termorregulação vertical, permitindo que os indivíduos permaneçam em profundidades médias e otimizem sua taxa de consumo energético (Pitcher et al., 2007).

Os resultados aqui obtidos lançam luz sobre as capacidades fisiológicas da albacora laje em termos de profundidade e temperatura alcançadas pela espécie. O comportamento de mergulhos em águas profundas, embora fuja do padrão de tolerância térmica apresentado pela espécie até hoje (Block et al., 1997, Bernal et al., 2017, Aoki et al., 2020), é conhecido e descrito por outros pesquisadores no Oceano Índico e Pacífico (Dagorn et al., 2006; Schaefer et al., 2007, 2011). Não é possível saber com precisão os motivos pelos quais a espécie realiza incursões em profundidades, mas algumas hipóteses como fuga de eventuais predadores, busca por disponibilidade de presas como organismos mesopelágicos, ou até mesmo uma tentativa de se livrar de um corpo estranho, como as marcas acopladas ao seu corpo (Dagorn et al., 2006).

Embora tecnologias do tipo *Pop-up Satellite Archival Tags* sejam ferramentas cruciais em estudos comportamentais de diversas espécies marinhas, apresentam algumas dificuldades. Para exemplificar estas problemáticas temos a soltura prematura das marcas, mortalidade dos animais ou dilaceramento do músculo inerentes ao processo de marcação ou até mesmo pela pressão de profundidades altas, falhas nos sensores e conseqüente armazenamento-transmissão dos dados obtidos. Neste estudo observamos com a soltura precoce das marcas, um fato delicado também observado por outros pesquisadores (Arrizabalaga, 2005; Chiang et al., 2011; Musyl et al., 2011; Muir et al., 2022). Muir et al. (2022) ao analisar o comportamento vertical relatado pelas marcas após a soltura dos indivíduos capturados através de espinhel por exemplo, sugere que apesar de os peixes

serem selecionados pela equipe científica como estando na melhor condição possível para marcação, a probabilidade de sobrevivência após a soltura é geralmente baixa. Como razões, indicadores como tempo no anzol, o transporte e a captura podem deixar os peixes muito exaustos ou estressados para sobreviver à liberação de volta ao seu ambiente, além da possibilidade de incidência de ferimentos graves não aparentes em um exame externo (Muir et al., 2022). Além disso, o estresse gerado no peixe o torna vulnerável tanto para reequilibrar suas condições fisiológicas, quanto para livrar-se da predação por parte de tubarões por exemplo (Figura 1 - Anexo).

Os resultados obtidos são a continuidade de esforços anteriormente empregados para entender a bioecologia da albacora laje (*Thunnus albacares*) no Oceano Atlântico Oeste. Ampliamos as áreas de estudo e fornecemos novos aspectos sobre a movimentação horizontal e vertical da albacora laje. As formas de uso do habitat foram diferenciados entre as três regiões de estudo: Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) e Cabo Frio (RJ). Os indivíduos no ASPSP exibiram maior dispersão, enquanto aqueles em FN e no RJ demonstraram maior fidelidade ao habitat, possivelmente devido à disponibilidade de alimento e condições ambientais locais. A movimentação vertical indicou um padrão diurno de permanência em águas superficiais (0 a -50 m, 20–30°C) e mergulhos noturnos mais profundos (>200 m) ampliando as informações sobre as capacidades fisiológicas da albacora laje nestas áreas.

A partir dos resultados obtidos, novas investigações podem aprofundar o conhecimento sobre a ecologia da albacora laje, incluindo: (i) Estudos de longo prazo, através do monitoramento contínuo para elucidar padrões sazonais de movimentação e uso do habitat; (ii) Investigação do impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição da espécie; (iii) Investigação sobre a estrutura genética das populações em diferentes regiões para avaliar a conectividade entre estoques. Deste modo, reiteramos que a continuidade das pesquisas nesta temática contribuem para o desenvolvimento e manutenção sustentável não apenas do recurso pesqueiro, mas também das regiões política e estrategicamente importantes para o Brasil.

## REFERÊNCIAS

---

- Arrizabalaga, H., & Pereira, J. G. (2005). Bigeye pop-up tagging results in Azorian waters. *Collect Vol Sci Pap ICCAT*, 57, 137-150
- Andrade Pereira, A. (2007). Comportamento da albacora laje *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-graduação em Oceanografia
- Aoki, Y., Aoki, A., Ohta, I., & Kitagawa, T. (2020). Physiological and behavioural thermoregulation of juvenile yellowfin tuna *Thunnus albacares* in subtropical waters. *Marine Biology*, 167(6), 71
- Bard, FX, Scott, ED (1992) Results of transatlantic tagging of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) up to 1/10/91. *Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 39(1): 46-49
- Bard, FX, Hervé, A (1994) Structure de stock de l'albacore (*Thunnus albacares*) Atlantique d'après les marquages comparés aux lieux de ponte. *Inter. Comm. Cons. Atlan. Tunas, Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 42(2): 204-208
- Bernal, D., Brill, R. W., Dickson, K. A., & Shiels, H. A. (2017). Sharing the water column: physiological mechanisms underlying species-specific habitat use in tunas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27, 843-880
- Brill, RW, Block, BA, Boggs, CH, Bigelow, KA, Freund, EV, Marcinek, DJ, (1999) Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: implications for the physiological ecology of pelagic fishes. *Marine Biology* 133:395-408
- Block, BA, Keen, JEB, Castillo, H, Freund, EV, Marcinek, DJ, Brill, RW, Farwell, C (1997) Environmental Preferences of Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) at the Northern Extent of its Range. *Marine Biology* 130 (1): 119-132
- Campos DMDAR, Silva AD, Sales NDS, Oliveira REMCC, Pessanha ALM (2015) Trophic relationships among fish assemblages in a mudflat within Brazilian marine protected area. *Brazilian Journal of Oceanography*, 63, 135-146
- CBD (2014) Ecologically or Biologically Significant Marine Areas (EBSAs) Special places in the world's oceans. Wider Caribbean and western Mid-Atlantic, 2nd ed. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Recife, Brazil
- Collette, BB, Nauen, CE (1983) Scombrids of the world: an annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. v. 2
- Chiang, W. C., Musyl, M. K., Sun, C. L., Chen, S. Y., Chen, W. Y., Liu, D. C., & Huang, T. L. (2011). Vertical and horizontal movements of sailfish (*Istiophorus platypterus*) near Taiwan determined using pop-up satellite tags. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 397(2), 129-135
- Dagorn, L., Holland, K. N., Hallier, J. P., Taquet, M., Moreno, G., Sancho, G., ... & Fonteneau, A. (2006). Deep diving behavior observed in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Aquatic Living Resources*, 19(1), 85-88

Dagorn, L, Holland, KN, Itano, DG, (2007) Behavior of yellowfin (*Thunnus albacares*) and bigeye (*T. obesus*) tuna in a network of fish aggregating devices (FADs). *Marine Biology* 151, 595–606

Diaha NC, Zudaire I, Chassot E, Barrigah DB, Irie YD, G beazere DA, Kouadio D, Pecoraro C, Romeo MU, Murua H, Amade MJ, Dewals P, Bodin N (2016) Annual monitoring of reproductive traits of female yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Atlantic Ocean. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 72(2):534-548

FAO (2022) *The State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation.* 266 p. Rome, FAO

Fonteneau, A (1994) Structure de la population d'albacore de l'Atlantique: quelques considérations sur les migrations et la modélisation. *Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 42(2): 215-218

Fonteneau, A., Chassot, E., & Bodin, N. (2013). Global spatio-temporal patterns in tropical tuna purse seine fisheries on drifting fish aggregating devices (DFADs): Taking a historical perspective to inform current challenges\*. *Aquatic Living Resources*, 26(1), 37-48

Fréon, P., & Dagorn, L. (2000). Review of fish associative behaviour: toward a generalisation of the meeting point hypothesis. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 10(2), 183-207

Garçon, V., Karstensen, J., Palacz, A., Telszewski, M., Aparco Lara, T., Breitburg, D., ... & Weng, K. (2019). Multidisciplinary observing in the world ocean's oxygen minimum zone regions: from climate to fish—the VOICE Initiative. *Frontiers in Marine Science*, 6, 722

Hoolihan, J. P., Wells, R. J. D., Luo, J., Falterman, B., Prince, E. D., & Rooker, J. R. (2014). Vertical and horizontal movements of yellowfin tuna in the Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries*, 6(1), 211-222

Hoolihan, J. P., Luo, J., Abascal, F. J., Campana, S. E., De Metrio, G., Dewar, H., & Rooker, J. R. (2011). Evaluating post-release behaviour modification in large pelagic fish deployed with pop-up satellite archival tags. *ICES Journal of Marine Science*, 68(5), 880-889

Muir, J. A., Barker, R. J., Hutchinson, M. R., Leroy, B. M., Nicol, S. J., & Phillips, J. S. (2022). Estimating post-release mortality of long-line caught tropical tunas in the Pacific Ocean. *Fisheries Research*, 249, 106194

Musyl, M. K., Domeier, M. L., Nasby-Lucas, N., Brill, R. W., McNaughton, L. M., Swimmer, J. Y., & Liddle, J. B. (2011). Performance of pop-up satellite archival tags. *Marine Ecology Progress Series*, 433, 1-28

MONTEIRO, E. R. D. S. (2018). Deslocamentos horizontais e verticais de pequena escala realizados pela albacora laje *Thunnus albacares* no Arquipélago São Pedro e São Paulo. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Pesca e Aquicultura*, 36 páginas

Nimit, K., Masuluri, N. K., Berger, A. M., Bright, R. P., Prakash, S., TVS, U., & Varghese, S. P. (2020). Oceanographic preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in warm stratified oceans: A remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing*, 41(15), 5785-5805

- Niella, Y. V., Duarte, L. A. G., Bandeira, V. R., Crespo, O., Beare, D., & Hazin, F. H. V. (2018). Cookie-cutter shark *Isistius* spp. predation upon different tuna species from the south-western Atlantic Ocean. *Journal of Fish Biology*, 92(4), 1082-1089
- Pedersen, M. W., Patterson, T. A., Thygesen, U. H., & Madsen, H. (2011). Estimating animal behaviour and residency from movement data. *Oikos*, 120(9), 1281-1290
- Pitcher, TJ, Morato, T, Hart, PJB, Clark, MR, Haggan, N, Santos, RS (2007). *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK
- Price, M. E., Randall, M. T., Sulak, K. J., Edwards, R. E., & Lamont, M. M. (2022). Temporal and spatial relationships of yellowfin tuna to Deepwater petroleum platforms in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries*, 14(4), e10213
- Robert, M, Dagorn, L, Deneubourg, JL, Itano, D, Holland, K (2012) Size-dependent behaviour of tuna in an array of fish aggregating devices (FADs). *Marine Biology* 159, 907–914. DOI: 10.1007/s00227-011-1868-3
- Rohner, C. A., Naveira Garabato, A. C., Hearn, A. R. (2023). Movement and vertical habitat use of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in a vertically compressed habitat: the Galápagos Marine Reserve. *Journal of Fish Biology*.
- Serafini TZ, de França GB, Andriquetto-Filho JM (2010) Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(3), 281-301
- Sibert, J. R., & Nielsen, J. L. (Eds.). (2001). *Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries: Proceedings of the Symposium on Tagging and Tracking Marine Fish with Electronic Devices, February 7–11, 2000, East-West Center, University of Hawaii (Vol. 1)*. Springer Science & Business Media
- Sibert, J, Hampton, J, (2003) Mobility of tropical tunas and the implications for fisheries management. *Marine Policy* 27, 87–95
- Silva BJ, Gaspar FL, Tyaquiçã P, Lefèvre N, Montes MJF (2019) Carbon chemistry variability around a tropical archipelago. *Marine and Freshwater Research*, 70(6), 767-780
- Schaefer, MB, Chatwin, BM, Broadhead, GC (1961) Tagging and recovery of tropical tunas 1955-1959
- Schaefer, KM, Fuller, DW, Block, BA (2007) Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Marine Biology*, 152, 503-525
- Schaefer, KM, Fuller, DW (2013) Simultaneous behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), bigeye (*Thunnus obsesus*), and yellowfin (*T. albacares*) tunas, within large multi-species aggregations associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the equatorial eastern Pacific Ocean. *Marine biology*, 160, 3005-3014
- Travassos P, Hazin FHV, Zaglaglia JR, Advíncula R, Schober J (1999) Thermohaline structure around seamounts and islands off North-Eastern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2/3), 211-222

Valentin, J. L. (1984). Analyse des paramètres hydrobiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). *Marine Biology*, 82(3), 259-276

Valentin, J. L. (2001). The cabo frio upwelling system, Brazil. In *Coastal marine ecosystems of Latin America* (pp. 97-105). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

Weng, KC, Stokesbury, MJW, Boustany, AM, Seitz, AC, Teo, SLH, Miller, SK, Block, BA, (2009) Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags. *Journal of Fish Biology* 74:1434–1449

Wright, SR, Righton, D, Naulaerts, J, Schallert, RJ, Bendall, V, Griffiths, C, Castleton, M, David-Gutierrez, D, Madigan, D, Beard, A, Clingham, E, Henry, L, Laptikhovsky, Michael, C, Beare, D, Thomas, W, Block, BA, Collins, MA (2021) Fidelity of yellowfin tuna to seamount and island foraging grounds in the central South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 172, 103513

### Cap. III

#### Marcadores Artificiais: Dinâmica espaço-temporal

---

#### Artigo 3 – Nota Científica:

#### *Experimento utilizando Telemetria Acústica no Arquipélago em São Pedro e São Paulo*



Arquipélago de São Pedro e São Paulo - ASPSP. Foto: Karla Martins

## Exploring the behaviour of yellowfin tuna in the São Pedro and São Paulo Archipelago: an experiment using acoustic telemetry

Karla Martins<sup>1\*</sup>, Yuri Niella<sup>2</sup>, Paulo Travassos<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Laboratório de Ecologia Marinha, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil

<sup>2</sup>IMOS Animal Tracking, Sydney Institute of Marine Science, Australia

Corresponding author: [karla.martins@ufrpe.br](mailto:karla.martins@ufrpe.br)

Terceiro manuscrito da tese (nota científica), submetido em 2025 no periódico *Ocean and Coastal Research*

### ABSTRACT

The yellowfin tuna is a very abundant tropical tuna species in the western equatorial Atlantic Ocean and an important fishery resource for the Brazilian tuna fleet. This work offers the first report on the oceanic habitat use of the São Pedro and São Paulo archipelago (SPSPA) by the yellowfin tuna, using acoustic telemetry tags as a monitoring tool during a scientific expedition in April 2022. A total of 23 young yellowfin tuna measuring between 40 and 62 cm in total length were tagged with acoustic transmitters. The acoustic receiver detected the presence of eight (35%) tagged specimens in the vicinity of the SPSPA during the nine days of the experiment. Four individuals had more than 200 detections in a single day. Regarding the presence throughout the day, detections occurred mostly during the daytime period between 11 and 12 am, and the average depth most frequented by the specimens did not exceed 20 m. Complementary experiments are suggested, including a larger number of receivers and a longer monitoring period, to better understand the behaviour and preferences in habitat use by yellowfin tuna around oceanic islands.

**Keywords:** Acoustic telemetry, Tuna behavior, Oceanic Island, Marine Protected Area

Acoustic telemetry is a mechanism that allows behavioural tracking and the investigation of ecological issues in diverse organisms such as invertebrates, reptiles, marine mammals, sharks and a wide variety of fish (Matley et al., 2022, Taylor et al., 2017). This method helps to understand the origins and effects of species movements, as

well as their underlying patterns and processes on spatial-temporal scales of ecological relevance (Hussey et al., 2015). The technology is based on two main segments: transmitters that are fixed to the animals (internal and/or external) and emit coded ultrasonic signals (67 - 417 kHz), and receivers, which are submerged hydrophones to detect, decode and store the transmitted signals (Hellström et al., 2022). Acoustic transmitters can also be equipped with sensors that transmit environmental data (e.g., temperature, depth) or changes in the individual's behavioural or physiological state (e.g., acceleration, heart rate) (Crossin et al., 2017). With technological advancement, acoustic telemetry has revolutionized the understanding of marine sciences, especially with regard to pelagic predators.

Yellowfin tuna (*Thunnus albacares* – YFT) is a species with a wide geographic distribution, present in tropical and subtropical waters of the world's oceans (except the Mediterranean Sea) and with migratory behaviour (Collete and Nauen, 1983). It is one of the most important tropical tuna species in global fisheries, with global landings averaging 1.25 million tons/year in the last decade (Price et al., 2022). Tag and recapture studies highlight transatlantic migratory movements between the American coast and the African coast (Bard and Scott, 1991). A migratory cycle model proposed by Hazin (2005) for yellowfin tuna in the Equatorial portion of the Atlantic Ocean suggests that the species performs the following movements: 1) from January to March: concentration for spawning in the equatorial southeast Atlantic, in the Gulf of Guinea, off the coast of Africa; 2) April to June: transatlantic migration in an east-west direction, along the South Equatorial Current; 3) July to September: concentration for spawning in the northwest equatorial Atlantic, north of Venezuela; 4) October to December: transatlantic migration in a west-east direction, along the North Equatorial Counter current.

Formed by a small group of rocky islets, the São Pedro and São Paulo Archipelago (SPSPA) originates from the outcrop of the Mid-Atlantic Ridge in the Equatorial Atlantic (0°55'02"N, 029°20'42"W). It is approximately 533 nm (987 km) from Natal-RN (Brazil) and 985 nm (1,824 km) from Guinea-Bissau (Africa) (Viana et al., 2015). This archipelago is directly influenced by the South Equatorial Current that flows on the surface (east-west) and by the Submerged Equatorial Counter current that flows along the subsurface layer (west-east) (Travassos et al., 1999). The climatic conditions of this environment are affected by the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), characterized by low atmospheric pressure, weak winds and high precipitation, whose dynamics

influence the rainfall regime along the entire northeast coast of Brazil (Filho and Silva, 2015). Although inhospitable to humans, its geographic position between the two hemispheres and between the African and American continents and the aggregation of very diverse marine life in its surroundings for resting, feeding and reproduction purposes generate great scientific interest (Campos et al., 2005). The entire Exclusive Economic Zone (EEZ) in its surroundings is a Marine Protection Area (APA), and within it there is the Natural Monument of the Archipelago of São Pedro and São Paulo, both of which are part of this enormous conservation unit (Francini-Filho et al., 2018).

The behaviour and habitat use of yellowfin tuna using acoustic telemetry has been investigated in several locations around the world, detecting that the species presents different relationships with fishing aggregator devices (FADs) and seamounts (Block et al., 1997; Marsac and Cayré, 1998; Dagorn et al., 2000; Govinden et al., 2013, 2021). These relationships can vary between fidelity, residence (short and long term) or no relationship (Price et al., 2022). Important insights into the behaviour of predators such as tuna have been generated, however the association with islands and seamounts remains poorly understood. Furthermore, which factors contribute to the periods of permanence/residence also remain unknown. For the most part, behavioural studies with yellowfin tuna have been carried out in the Pacific and Indian Oceans, highlighting the need for research in other locations around the world. In this context, the present study carried out an acoustic telemetry experiment to evaluate the level of interaction between the yellowfin tuna and the archipelago of São Pedro and São Paulo, and verify the use of the oceanic habitat by the tagged predators during the experiment period. This research contributes to a broader and necessary understanding of the spatiotemporal dynamics, and the importance of a marine protected area for the behaviour of a tropical tuna species. This information is essential to unravel the dynamics of the migratory behaviour of the yellowfin tuna in the waters of the Equatorial Atlantic Ocean, contributing to stock management.

A fisheries research cruise was carried out in the Archipelago of São Pedro and São Paulo in April 2022. During the expedition, a multidirectional acoustic receiver (VR2W-69kHz) was installed at a depth of approximately 100 m on the western side of the archipelago (0°55'18.4" N, 029°19'98.0" W) to detect the tagged fish. The tuna was captured using handlines, carefully brought on board and placed in a V-shaped tagging framework. In this framework, the fish had their eyes covered with a black towel

moistened with seawater so that they would remain calm during the surgical procedure. Only fish without apparent injuries and in good health were chosen to receive the transmitters. Positioned with their belly up, they received oxygenation through a hose with a continuous and gentle flow of seawater passing through their gills. Then, through a small incision (2 cm) in the peritoneal cavity made with a scalpel, the acoustic tags (V9, V13, 69kHz, VEMCO, Innovasea) were inserted, and the wounds were closed with two non-absorbable monofilament nylon sutures. To facilitate the identification of the tagged fish in case of recapture, each individual also received an external plastic tag (10 cm) inserted in the second dorsal fin between the pterygophores. All fish had their biometrics measured before being released into the sea (Figure 1). The total time the fish remained out of the water during the procedure was between 1 and 2 minutes, and the individuals were released near the acoustic receiver. The internal tagging protocol described above was performed according to Dagorn et al., (2007).

Figure 1: Sequential diagram of the tagging procedure in the yellowfin tuna specimens at ASPSP: A) incision in the peritoneal cavity made with a scalpel, B) insertion of the



acoustic transmitter, C) external plastic tag inserted into the second dorsal fin, D) tuna release into the ocean.

To analyse the records obtained during the experimental days, the raw data were downloaded primarily from the VUE software (VEMCO, Innovasea). Then, to visualize

the behaviour of the tagged fish regarding their possible presence/permanence in the surroundings of the ASPSP (number of detections per experimental day), we used the visual abacus graph of the daily detections. Regarding the use of the habitat by the individuals in relation to the period of the day and depths detected, we applied the frequency distribution graph. All analyses were performed with the aid of the statistical software R (R version 4.2.0). A total of 23 young yellowfin tuna measuring between 40 and 62 cm in total length received V9 and V13 acoustic transmitters (VEMCO, Innovasea). The experiment recorded the presence of tagged specimens near the anchoring point of the acoustic receiver within a radius of approximately 500 m. The results obtained show that, of the total number of tagged individuals, eight fish (35%) were detected during all nine days that the receiver was present in the area, with four of these fish presenting more than 200 detections in a single day (Figure 2). Regarding the presence throughout the day, the majority of detections occurred during the daytime period between 11 and 12 am, and the average depth most frequented by the specimens did not exceed the 20 m mark (Figure 2).

In this experiment, we used acoustic telemetry to observe the local presence and habitat use behaviour of a marine protected area by individuals of the yellowfin tuna. Although the detection days were reduced due to the loss of the acoustic receiver, we observed some interactions of the yellowfin tuna around the SPSPA, which apparently remained in the location during the experiment. Evidence of local fidelity by the yellowfin tuna has already been observed around oil platforms and in other oceanic regions (Price et al., 2022; Schaefer et al., 2007). More isolated environments can provide greater regional permanence of the species, since they act as means of assistance to its navigation (Price et al., 2022). These means of assistance act as aggregating sites, reference points during its migratory movements and areas of energy enrichment (Holland et al., 1999, Price et al., 2022). According to Arrizabalaga et al. (2014), part of the tuna life cycle is related to extensive trophic migrations, associated with the search for areas of high productivity. Pereira (2007) observed through a specimen of yellowfin tuna (85 cm-TL) tagged in the SPSPA that the fish remained most of the time in the homogeneous layer, but was also capable of making incursions into colder waters during the day.

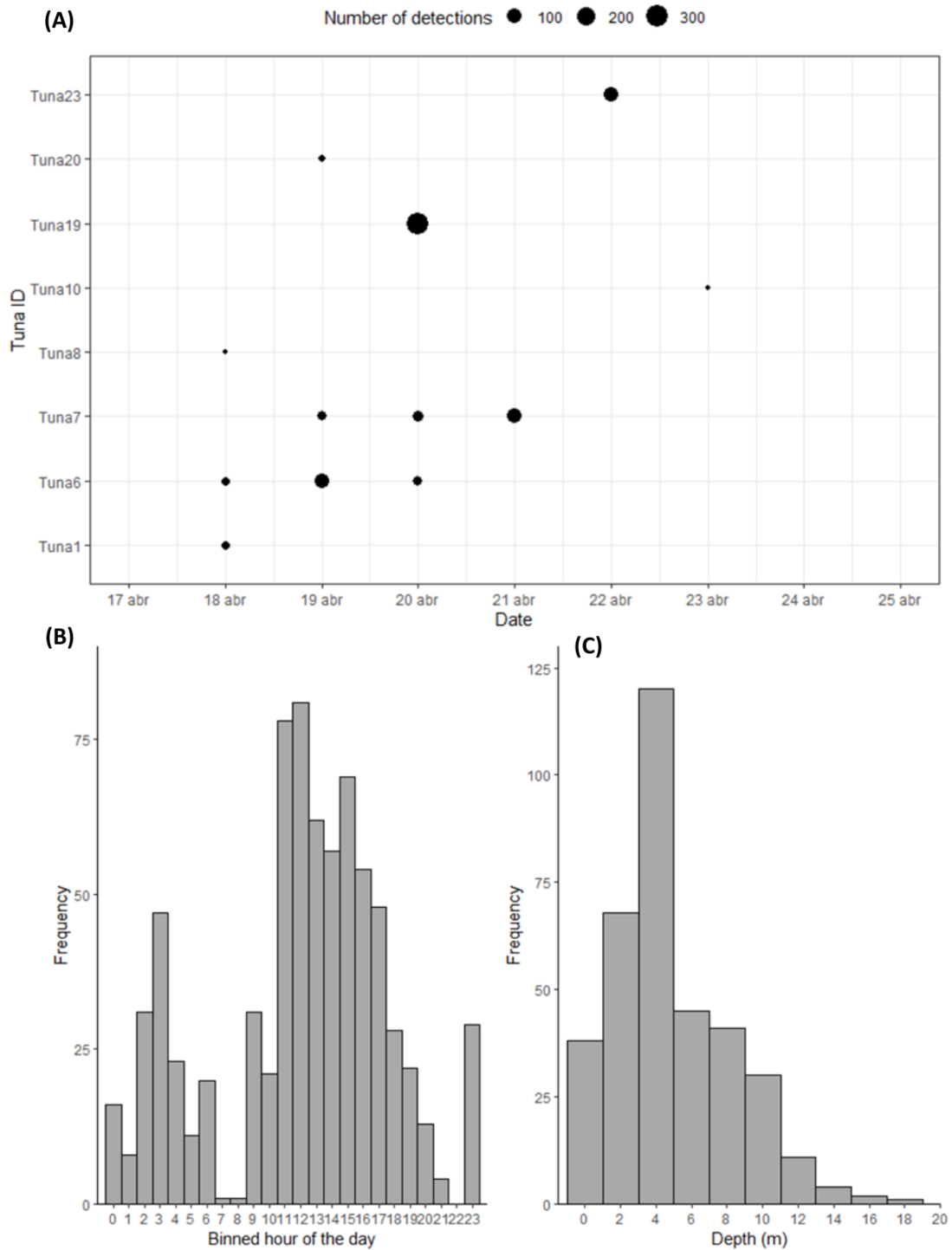


Figure 2: (A) Abacus graph showing the days of detection of juvenile yellowfin tuna (*Thunnus albacares* – YFT) tagged between 04/17/2022 and 04/25/2022 at SPSPA; Distribution of frequencies of (B) time of day and (C) depths most used by juvenile yellowfin tuna tagged at the same time period described above.

The specimens tagged in this experiment, mostly young individuals (<99.2 cm TL, Diaha et al., 2016), remained at shallow depths (<20 m) and were more frequently detected close to mid-day. Such behavioural strategies may be related, for example, to feeding activity. According to Schaefer et al. (2007), the availability of prey is an important requirement for the permanence of a significant biomass of yellowfin tuna in different environments. A relevant aspect of the behaviour of young individuals is the vertical movement more restricted to the mixed layer (Mitsunaga et al., 2012, Bernal et al., 2017) and a broad diet based on smaller prey, such as planktonic organisms present in the most superficial waters, for example (Eduardo et al., 2022, Martins et al., 2024). The associative behaviour of tuna near oceanic islands, seamounts and artificial aggregating devices may be related to the abundance and local availability of prey (Dagorn et al., 2007, Pitcher et al., 2007; Schaefer et al., 2013). The São Pedro and São Paulo archipelago is known for the strong grouping of flying fish in its surroundings, which are considered the main energy source for several predators (tunas, sharks, birds) (Monteiro et al., 1998). Concentrations of yellowfin tuna in this region occur throughout the year, especially between November and April, a period that coincides with the reproductive period of the flying fish (Vaske-Jr et al., 2003; Lessa et al., 1999), which is the base of the local food web. Despite their complex trophodynamics, oceanic island regions are crucial points in the life cycle of yellowfin tuna, especially with regard to energy gain in a phase of life in which they need to grow quickly.

This is the first study to reveal some aspects of the behaviour of young yellowfin tuna in the Equatorial Atlantic Ocean, such as the apparent permanence of these animals in the vicinity of the SPSPA for some days. We observed that the availability of prey may be an important factor for the association of yellowfin tuna with the studied island ecosystem. Studies conducted around aggregating devices (FADs) have shown that slab albacore return to the FADs and remain for a few days in these locations before continuing on their journey (Ohta and Kakuma, 2005; Dagorn et al., 2006). It is possible that individuals remain around the SPSPA for a few days to increase their energy reserves, and then continue or start their migration. Complementary experiments are suggested, including a larger number of receivers and a longer monitoring period, to better understand the behaviour and preferences in habitat use by yellowfin tuna around oceanic islands, contributing with new data that can be used in management models and stock assessment of the species in the Atlantic Ocean.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the financial supported that this research received by the Projeto de Apoio Técnico-Científico ao Desenvolvimento da Pesca de Atuns e Afins no Brasil (PROTUNA), funding through the Call MCTI/MPA/CNPq Nº 22/2015 – Management of the Brazilian Marine Fisheries. The main author received a PhD level scholarship from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). The authors also thank the Dr. Pedro Castilho and to all the fishermen of the Proarquipélago Program for their valuable contribution during the expedition days, tagging procedures and assistance during the activities on board the Alpha vessel.

## AUTHOR CONTRIBUTION

K.M.M.: Conceptualization; Investigation; Writing – original draft; Writing – review & editing;

Y. N.: Methodology; Software; Formal Analysis; Investigation; Writing – review & editing;

P.T.: Supervision; Resources; Project Administration; Funding Acquisition; Writing – review & editing.

## REFERENCES

ARRIZABALAGA, H., DUFOUR, F., KELL, L., MERINO, G., IBAIBARRIAGA, L., CHUST, G., BONHOMEAU, S. 2015. Global habitat preferences of commercially valuable tuna. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 113, 102-112.

BARD, F. X., SCOTT, E. D. 1991. Sept traverses transatlantiques d'albacores marques thons migrateurs ou sédentaires. *Collect. Vol. Sci. Pap, ICCAT*, 36(1), 205-222.

BERNAL, D., BRILL, R. W., DICKSON, K. A., & SHIELS, H. A. 2017. Sharing the water column: physiological mechanisms underlying species-specific habitat use in tunas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27, 843-880.

BLOCK, B. A., KEEN, J. E., CASTILLO, B., DEWAR, H., FREUND, E. V., MARCINEK, D. J., FARWELL, C. 1997. Environmental preferences of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) at the northern extent of its range. *Marine biology*, 130, 119-132.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

CROSSIN, G. T., HEUPEL, M. R., HOLBROOK, C. M., HUSSEY, N. E., LOWERRE-BARBIERI, S. K., NGUYEN, V. M., COOKE, S. J. 2017. Acoustic telemetry and fisheries management. *Ecological Applications*, 27(4), 1031-1049.

COLLETTE, B. B., NAUEN, C. E. 1983. Scombrids of the world: an annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos, and related species known to date. v. 2, FAO Fisheries Synopsis No. 125, Volume 2.

CAMPOS, T. F. D. C., VIRGENS NETO, J. D., SRIVASTAVA, N. K., PETTA, R. A., HARTMANN, L. A., MORAES, J. F. S. D., SILVEIRA, S. R. M. 2005. Arquipélagos de São Pedro e São Paulo: soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: SIGEP, 12 p.

DAGORN, L., HOLLAND, K. N., ITANO, D. G. 2007. Behavior of yellowfin (*Thunnus albacares*) and bigeye (*Thunnus obesus*) tuna in a network of fish aggregating devices (FADs). *Marine Biology* 151, 595–606.

DAGORN, L., JOSSE, E., BACH, P. 2000. Individual differences in horizontal movements of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in nearshore areas in French Polynesia, determined using ultrasonic telemetry. *Aquatic Living Resources*, 13(4), 193-202.

DE ANDRADE PEREIRA, A., PAULO, E. P. F. T 2007. Comportamento da albacora laje *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

DIAHA, N. C., ZUDAIRE, I., CHASSOT, E., BARRIGAH, B. D., IRIÉ, Y. D., GBEAZERE, D. A., BODIN, N. 2016. Annual monitoring of reproductive traits of female yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Atlantic Ocean. *Collect Vol Sci Pap ICCAT*, 72, 534-548.

EDUARDO, L. N., BERTRAND, A., MINCARONE, M. M., MARTINS, J. R., FRÉDOU, T., ASSUNÇÃO, R. V., LUCENA-FREDOU, F. 2021. Distribution, vertical migration, and trophic ecology of lanternfishes (Myctophidae) in the Southwestern Tropical Atlantic. *Progress in Oceanography*, 199, 102695.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

FRANCINI-FILHO, R. B., FERREIRA, C., MELLO, T. J., PRATES, A. P. L., SILVA, V. N. 2018. Diagnóstico Biológico e Sócio-Econômico para a proposta de criação de uma Área de Proteção Ambiental (APA) e um Monumento Natural Marinho (MONA) no Arquipélago São Pedro e São Paulo, Brasília.

GOVINDEN, R., JAUHARY, R., FILMALTER, J., FORGET, F., SORIA, M., ADAM, S., DAGORN, L. 2013. Movement behaviour of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) tuna at anchored fish aggregating devices (FADs) in the Maldives, investigated by acoustic telemetry. *Aquatic Living Resources*, 26(1), 69-77.

GOVINDEN, R., CAPELLO, M., FORGET, F., FILMALTER, J. D., DAGORN, L. 2021. Behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*), and bigeye (*T. obesus*) tunas associated with drifting fish aggregating devices (dFADs) in the Indian Ocean, assessed through acoustic telemetry. *Fisheries Oceanography*, 30(5), 542-555.

HAZIN, F. H. V. 1993. Grandes peixes pelágicos no Nordeste (atuns, agulhões e tubarões). Refinamento dos dados pretéritos sobre prospecção pesqueira do projeto de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva, MMA-REVIZEE.

HUSSEY, N. E., KESSEL, S. T., AARESTRUP, K., COOKE, S. J., COWLEY, P. D., FISK, A. T., WHORISKEY, F. G. 2015. Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world. *Science*, 348(6240), 1255642.

HELLSTRÖM, G., LENNOX, R. J., BERTRAM, M. G., BRODIN, T. 2022. Acoustic telemetry. *Current Biology*, 32(16), R863-R865.

HOLLAND, K. N., KLEIBER, P., KAJIURA, S. M. 1999. Different residence times of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, and bigeye tuna, *T. obesus*, found in mixed aggregations over a seamount. *Fishery Bulletin-National Oceanic and Atmospheric Administration*, v. 97, p. 392-395.

LESSA, R., & DUARTE-NETO, P. 2004. Age and growth of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western equatorial Atlantic, using dorsal fin spines. *Fisheries Research*, 69(2), 157-170.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

MATLEY, J. K., KLINARD, N. V., MARTINS, A. P. B., AARESTRUP, K., ASPILLAGA, E., COOKE, S. J., FISK, A. T. 2022. Global trends in aquatic animal tracking with acoustic telemetry. *Trends in Ecology and Evolution*, 37(1), 79-94.

MARSAC, F., & CAYRÉ, P. 1998. Telemetry applied to behaviour analysis of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*, Bonnaterre, 1788) movements in a network of fish aggregating devices. In *Advances in Invertebrates and Fish Telemetry: Proceedings of the Second Conference on Fish Telemetry in Europe, held in La Rochelle, France, 5–9 April 1997* (pp. 155-171).

MITSUNAGA, Y., ENDO, C., ANRAKU, K., CORNELIO, M., RICARDO, P. B. 2012. Association of early juvenile yellowfin tuna *Thunnus albacares* with a network of payaos in the Philippines. *Fisheries Science* 78, 15–22.

MARTINS, K., NIELLA, Y., ALBUQUERQUE, F., EDUARDO, L. N., OLIVEIRA, P., TRAVASSOS, P. 2024. Feeding behavior of yellowfin tuna around two insular regions of the western Atlantic Ocean. *Journal of Fish Biology*, 104(4), 1112-1121.

MONTEIRO A., VASKE T., LESSA R. P., EL-DEIR, A. C. A. 1998. Exocoetidae (Beloniformes) off Northeastern Brasil. *Cybium*, 22:395–403.

OHTA, I., & KAKUMA, S. 2005. Periodic behavior and residence time of yellowfin and bigeye tuna associated with fish aggregating devices around Okinawa Islands, as identified with automated listening stations. *Marine Biology*, 146:581–594.

PRICE, M. E., RANDALL, M. T., SULAK, K. J., EDWARDS, R. E., LAMONT, M. M. 2022. Temporal and Spatial Relationships of Yellowfin Tuna to Deepwater Petroleum Platforms in the Northern Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries*, 14(4), e10213.

PITCHER, T. J., MORATO, T., HART, P. J. B., CLARK, M. R., HAGGAN, N., SANTOS, R. S. 2007. *Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK.

SCHAEFER, K. M., FULLER, D. W., BLOCK, B. A. 2007. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Marine Biology*, 152, 503-525.

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

SCHAEFER, K. M., & FULLER, D. W. 2013. Simultaneous behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), bigeye (*Thunnus obsesus*), and yellowfin (*T. albacares*) tunas, within large multi-species aggregations associated with drifting fish aggregating devices (FADs) in the equatorial eastern Pacific Ocean. *Marine biology*, 160, 3005-3014.

TAYLOR, M. D., BABCOCK, R. C., SIMPFENDORFER, C. A., CROOK, D. A. 2017. Where technology meets ecology: acoustic telemetry in contemporary Australian aquatic research and management. *Marine and Freshwater Research*, 68(8), 1397-1402.

TRAVASSOS, P., HAZIN, F. H. V., ZAGLAGLIA, J. R., ADVÍNCULA, R., SCHOBER, J. 1999. Thermohaline structure around seamounts and islands off North-Eastern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2/3).

VIANA, D. F., HAZIN, F. H. V., ANDRADE, H. A., NUNES, D. N., VIANA, D. L. 2015. Fisheries in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago: 13 years of monitoring. *Boletim do Instituto de Pesca*, São Paulo, 41(2): 239 – 248.

VASKE, T. JR., VOOREN, C. M., LESSA, R. P. 2003. Feeding strategy of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), and wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca*, 29: 173–181.

#### 4 Considerações Finais

Esta tese fornece novas informações que contribuem para a compreensão dos aspectos bioecológicos da albacora laje abordando aspectos do seu comportamento trófico e da sua relação com o habitat oceânico em regiões insulares do Atlântico Oeste Tropical. A partir da aplicação de marcadores naturais (isótopos estáveis) e artificiais (telemetria acústica), foi possível descrever padrões importantes de uso do espaço e interações ecológicas. Embora novos esforços tenham sido empregados, ainda há lacunas de conhecimento e novas questões podem se tornar objetos de estudo no futuro.

Os resultados obtidos demonstram que a albacora laje apresenta uma relação complexa e dinâmica com o ambiente oceânico, especialmente em áreas marinhas protegidas. Nos capítulos aqui apresentados, observamos que a albacora laje pode modular seu comportamento tanto alimentar quanto em relação aos movimentos que realiza; em resposta à disponibilidade local de recursos, demonstrando uma plasticidade trófica essencial para sua sobrevivência em ambientes oceânicos heterogêneos (Baquemenoscal, et al., 2012; Páez-Rosas et al., 2020). Além disso, integração dos resultados permite refletir sobre o fato de que as áreas marinhas protegidas desempenham um papel crítico na dinâmica espaço-temporal da albacora laje. O ASPSP e o AFN por exemplo, podem atuar como *stepping stone* (Rowden et al., 2010) ecológico ao longo das rotas migratórias, oferecendo recursos alimentares essenciais em momentos estratégicos do ciclo de vida da espécie. Essa hipótese é particularmente relevante no contexto do manejo pesqueiro, pois indica que a proteção de ecossistemas insulares pode ter impactos positivos na conservação de espécies altamente migratórias. Isso reforça a importância de políticas voltadas para a gestão sustentável da pesca, considerando não apenas a proteção de estoques, mas também a preservação dos habitats críticos para a manutenção da produtividade biológica dos oceanos.

A duração limitada em especial dos experimentos com telemetria (acústica e satélite) restringiram a capacidade de captar padrões mais extensos de residência e movimentação. Essa limitação enfatiza a necessidade de pesquisas futuras com maior cobertura espacial e temporal, incorporando diferentes estações do ano e ampliando o número de indivíduos monitorados para determinar padrões sazonais de uso do habitat. Esta pesquisa abre caminho para novas investigações, incluindo: (i) Monitoramento de

longo prazo: a ampliação de experimentos de telemetria acústica e satelital permitirá um entendimento mais detalhado sobre os padrões migratórios e o grau de fidelidade a habitats específicos; (ii) Efeitos das mudanças climáticas: investigar como variações na temperatura e na circulação oceânica podem afetar a distribuição da albacora laje e sua relação com ambientes insulares; (iii) Interações tróficas em diferentes escalas: pesquisas utilizando uma abordagem combinada de biomarcadores, como ácidos graxos e isótopos múltiplos, podem fornecer uma visão ainda mais ampla sobre o comportamento alimentar e migratório da espécie.

Por fim, os resultados desta tese demonstram a importância de integrar diferentes ferramentas metodológicas para aprimorar a compreensão da ecologia de espécies marinhas de alto valor econômico e ecológico. O uso combinado de marcadores naturais e artificiais revelou aspectos essenciais da biologia da albacora laje, destacando a relevância de áreas marinhas protegidas na sua sustentabilidade. Diante do cenário de crescentes desafios ambientais e da intensificação da atividade pesqueira, torna-se essencial adotar uma abordagem ecossistêmica para a gestão dos recursos pesqueiros, assegurando a sustentabilidade das populações de atuns e a manutenção dos serviços ecossistêmicos para o equilíbrio dos oceanos.

## Referências

Baque-Menoscal J, Páez-Rosas D, Wolff M. (2012) Hábitos alimentarios de dos peces pelágicos *Thunnus albacares* y *Acanthocybium solandri* de la Reserva Marina de Galápagos. Rev Biology Marine Oceanography 47:1–11

Páez-Rosas, D., Galván-Magaña, F., Baque-Menoscal, J., Tripp-Valdez, A., Fischer, C., & Hearn, A. (2020) Trophic preferences of three pelagic fish inhabiting the Galapagos Marine Reserve: ecological inferences using multiple analyses. Environmental Biology of Fishes, 103, 647-665

Reid, W. V. (1998). Biodiversity hotspots. Trends in ecology & evolution, 13(7), 275-280

Rowden, A.A., Dower, J. F., Schlacher, T. A., Consalvey, M., Clark, M. (2010) Paradigms in seamount ecology: fact, fiction and future. Marine Ecology 31:226–241

## Anexos



Figura 1 - Anexo: Registro de depredação em exemplar de albacora laje (*Thunnus albacares*) por tubarão no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Expedição realizada em abril/2022).

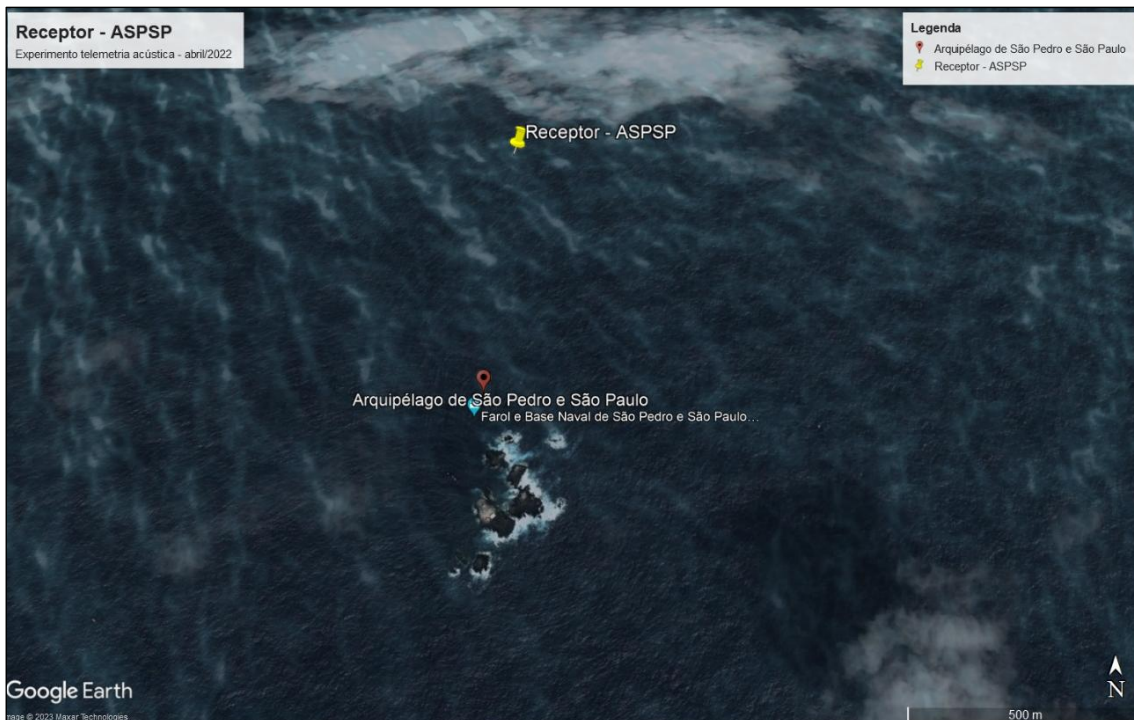


Figura 2 - Anexo: Área de estudo do experimento de marcação com telemetria acústica e localização do ponto de instalação do receptor acústico no ASPSP (lado oeste do arquipélago, nas coordenadas: 0°55'18.4" N, 029°19'98.0" W)

Tabela 1 - Anexo: Sumário do experimento de telemetria acústica no ASPSP em abril/2022 com sequência de atuns marcados, data e horário das marcações e o comprimento total dos peixes em centímetros.

ID	Data	Horário	CT (cm)
Tuna 1	17/04/22	05:52	56
Tuna 2	17/04/22	06:20	62
Tuna 3	17/04/22	06:27	60
Tuna 4	17/04/22	06:43	49
Tuna 5	18/04/22	05:15	54
Tuna 6	18/04/22	05:36	51
Tuna 7	18/04/22	06:00	57
Tuna 8	18/04/22	06:07	53
Tuna 9	19/04/22	05:20	58
Tuna 10	19/04/22	05:25	60
Tuna 11	19/04/22	05:36	53
Tuna 12	19/04/22	05:51	56
Tuna 13	19/04/22	05:53	56
Tuna 14	19/04/22	06:00	53
Tuna 15	19/04/22	06:03	58
Tuna 16	19/04/22	06:05	57
Tuna 17	19/04/22	06:10	54
Tuna 18	19/04/22	06:40	56
Tuna 19	19/04/22	06:45	55
Tuna 20	19/04/22	07:39	57

MARTINS, KM. Ecologia trófica, uso do habitat e migração da albacora laje (*Thunnus albacares* Bonnaterre, 1788) no Atlântico Oeste Tropical

Tuna 21	22/04/22	05:21	60
Tuna 22	22/04/22	05:48	57
Tuna 23	22/04/22	06:40	48

---