



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA



YURI VIEIRA NIELLA

OCORRÊNCIA, BIOLOGIA E MOVIMENTAÇÃO DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA,
Carcharhinus leucas, **NO LITORAL NORDESTE DO BRASIL**

RECIFE

2016

YURI VIEIRA NIELLA

**OCORRÊNCIA, BIOLOGIA E MOVIMENTAÇÃO DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA,
Carcharhinus leucas, NO LITORAL NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia (PPGO) da Universidade Federal de Pernambuco, como um dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Oceanografia na área de Oceanografia Biológica.

Orientador: Dr. Fábio Hissa Vieira Hazin

Co-orientador: Dr. André Sucena Afonso

RECIFE

2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

N668o Niella, Yuri Vieira.

Ocorrência, biologia e movimentação do tubarão cabeça-chata,
Carcharhinus leucas, no litoral nordeste do Brasil./ Yuri Vieira Niella
- Recife: O Autor, 2016.
121 folhas. Il., e Tabs.

Orientador: Profº. Dr. Fábio Hissa Vieira Hazin.
Coorientador: Profº Dr. André Sucena Afonso.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2016.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Oceanografia. 2. Estrutura populacional. 3. Pesticidas orgânicos.
4. Sazonalidade. 5. Telemetria. 6. Ataques de tubarão. II. Hazin, Fábio Hissa Vieira
(Orientador). III. Afonso, André Sucena (Coorientador). III. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2016 - 84

YURI VIEIRA NIELLA

**OCORRÊNCIA, BIOLOGIA E MOVIMENTAÇÃO DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA,
Carcharhinus leucas, NO LITORAL NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia (PPGO), da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Oceanografia na Área de Oceanografia Biológica.

Aprovada em 19/02/2016

BANCA EXAMINADORA

Dr. Fábio Hissa Vieira Hazin

Dra. Maria Elisabeth de Araújo

Dr. José Carlos Pacheco dos Santos

RECIFE

2016

Dedico esse trabalho aos meus pais, por terem sempre acreditado no meu potencial e me incentivado a correr atrás dos meus objetivos e sonhos. Eu jamais teria chegado até aqui sem o apoio deles.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Dr. Fábio Hissa Vieira Hazin, pela confiança em mim depositada e pelo conhecimento comigo compartilhado ao longo desses anos. Serei eternamente grato pela oportunidade que me foi dada de finalmente trabalhar com aquilo que sempre desejei, desde o início da minha graduação.

Ao meu co-orientador, e amigo, Dr. André Sucena Afonso, pela paciência diária e disposição em ajudar. Muito obrigado por nunca ter me dado o peixe, mas sim me ensinado a pescar! Sem dúvida que você foi um dos grandes responsáveis pelo meu amadurecimento científico ao longo desses dois anos, e eu tenho certeza de que a nossa amizade irá continuar ainda por vários anos.

Aos meus pais Givaldo e Eliana, que são os grandes responsáveis por eu ter chegado até aqui, e por me sentir motivado a ir ainda mais longe. Mesmo distante eu sempre levarei vocês comigo, e um “muito obrigado” nunca será suficiente para agradecer por tudo o que vocês me ensinaram e me ensinam até hoje. Amo muito vocês!

À minha esposa Aynna, por ter sempre estado ao meu lado me confortando e motivando nas dificuldades, e comemorando nas vitórias. Você é mais do que a minha mulher, é a minha melhor amiga! Te amo!

À minha amiga Lorena, por ter me dito uma frase que jamais vou esquecer: “Vá fazer aquilo que você gosta!”. Você me motivou a ir em busca dos meus sonhos, e eu serei eternamente grato por isso!

Aos professores e funcionários do Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco. Aos professores, agradeço e me sinto honrado por terem comigo compartilhado uma parte importante do seu conhecimento científico de maneira tão didática e acessível.

O meu agradecimento em especial à Profa. Dra. Maria Elisabeth de Araújo pelos ensinamentos, e pelo carinho, amizade e paciência. A sua paixão pela ciência e o brilho nos seus olhos em sala de aula, me inspiram em buscar ser um pesquisador melhor a cada dia.

Aos colegas de laboratório Renato Galindo e Elizabeth Cavalcanti pela ajuda com as análises das nadadeiras deformadas dos tubarões cabeça-chata e também ao Prof. Dr. Gilvan Yogui e aos alunos do OrganoMar pela ajuda com as análises de poluentes orgânicos nos tecidos desses tubarões.

Aos professores e funcionários do Departamento de Pesca e Aquicultura da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo acolhimento no Laboratório de Tecnologia Pesqueira. Em especial aos meus “irmãos do peito” que ganhei ao longo desses dois anos, Rafael Muniz (Brutal) e Bruno César, pela ajuda logística e por terem tornado o laboratório um ambiente de trabalho descontraído e agradável.

Aos demais colegas e pesquisadores, com quem eu tive o prazer de conviver e aprender bastante ao longo desse tempo. Não vou citar seus nomes aqui, pois me faltaria espaço, mas podem ter certeza que vou sempre me lembrar de cada um de vocês, que foram responsáveis em parte pelo meu sucesso, e eu gostaria de expressar aqui a minha gratidão.

E aos pescadores que trabalharam no projeto ao longo de todos esses anos, com os quais pude aprender bastante a partir do seu conhecimento empírico, e cujo trabalho foi de fundamental importância para a realização desse trabalho.

Muito obrigado!

“Nós não temos medo dos predadores, nós ficamos paralisados em relação a eles, e tentados a tecer estórias e fábulas, e ter conversas infundáveis sobre eles, porque a fascinação cria o preparo, e o preparo, a sobrevivência. Em uma maneira profundamente tribal, nós amamos os nossos monstros...”

E. O. Wilson. - Sociobiólogo

RESUMO

Os tubarões cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*) são importantes predadores de topo, sendo um dos poucos condrictes capazes de sobreviver tanto em ambiente marinho como de água doce devido a especializações fisiológicas. O objetivo desse trabalho consistiu em analisar a estrutura populacional e a biologia dos tubarões *C. leucas* capturados no âmbito do Projeto de Pesquisa e Monitoramento de Tubarões no Estado de Pernambuco, além de estudar os seus movimentos utilizando transmissores acústicos e por satélite. Um total de 18 tubarões cabeça-chata foram amostrados na costa da Região Metropolitana do Recife entre maio de 2004 e dezembro de 2014, utilizando espinhéis de fundo e linhas de espera, lançados nas praias de Boa Viagem, Piedade e Paiva. Os animais capturados vivos foram marcados e liberados, enquanto aqueles que não sobreviveram foram encaminhados ao laboratório para análise da biologia reprodutiva e do conteúdo estomacal. A ocorrência local de *C. leucas* foi investigada utilizando modelos aditivos generalizados (GAM). As alterações morfológicas encontradas em dois espécimes foram investigadas por meio de radiografias, dissecações e análises de poluentes. Houve uma maior probabilidade de captura nas praias de Boa Viagem e Piedade. Foi observada uma maior ocorrência de *C. leucas* entre os meses de novembro e fevereiro e durante períodos de lua cheia, com uma presença mais provável com ventos mais fracos, temperaturas da superfície do mar mais quentes e baixos índices pluviométricos. Foram encontradas baixas concentrações de poluentes orgânicos nos indivíduos que apresentaram deformações esqueléticas, sugerindo outras fontes para o fenótipo observado. O tubarão monitorado realizou a maior movimentação descrita para um macho dessa espécie, alternando o seu modo de deslocamento entre residente e transiente e utilizando preferencialmente águas da plataforma continental brasileira, tendo ainda entrado em uma região estuarina. Este estudo ressalta a importância dos ambientes costeiros para os tubarões cabeça-chata e fornece informações importantes para o manejo dessa espécie nessa parte do Oceano Atlântico, além de subsidiar o desenvolvimento de estratégias de mitigação do risco de ataque de tubarão em Pernambuco.

Palavras Chave: estrutura populacional, pesticidas orgânicos, sazonalidade, telemetria, ataques de tubarão.

ABSTRACT

The bull sharks (*Carcharhinus leucas*) are important marine top predators and are one of the few chondrichthyes able to survive both in marine and in freshwater environments due to physiological specializations. The objective of this study was to analyze the population structure and biology of the *C. leucas* caught on the scope of the Project of Research and Monitoring of Sharks of Pernambuco State, and to study its movements using acoustic and satellite transmitters. Eighteen bull sharks were caught off the Metropolitan Region of Recife between May 2004 and December 2014 using bottom longlines and drumlines deployed at Boa Viagem, Piedade and Paiva beaches. The sharks which were captured alive were tagged and released whereas the ones that did not survive were taken to the laboratory for analysis of reproductive biology and stomach contents. The local occurrence of *C. leucas* was investigated with generalized additive models (GAM). The morphological abnormalities found in two specimens were investigated with radiographs, dissections and analysis of pollutants. There was a higher likelihood of catching bull sharks at Boa Viagem and Piedade beaches. Besides, a greater abundance of *C. leucas* was evidenced between November and February and during full moon periods, with lower wind speeds, warmer sea surface temperatures and lower pluviosity. The low concentrations of organic pollutants found in the specimens with skeletal deformities suggested other sources to explain the observed phenotype. The monitored shark performed the greatest movement ever reported for a male bull shark, varying its movement mode between resident and transient. In addition, it exhibited a preference for shallow waters of the continental shelf and also entered an estuarine region by the end of the track. This study highlights the importance of coastal habitats for bull sharks, and provides important information for the management of the species at this part of the Atlantic Ocean, as well as to develop efficient mitigation strategies towards the risk of shark attacks in Pernambuco.

Keywords: populational structure, organic pesticides, seasonality, telemetry, shark attacks.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1.1. Área de estudo e disposição dos aparelhos de pesca. Detalhe da configuração espacial dos equipamentos de pesca lançados paralelamente à costa nas respectivas áreas de pesca ao longo da Região Metropolitana do Recife (RMR)27

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Nadadeira caudal do primeiro tubarão (T1) capturado na costa da RMR apresentando deformação no lobo superior39

Figura 2.2. Nadadeira a) caudal e b) dorsal do segundo tubarão (T2) cabeça-chata capturado na costa da RMR exibindo alterações morfológicas39

Figura 2.3. Nadadeiras caudais de tubarões cabeça-chata a) sem deformação e b) apresentando deformação ondulatória no lobo superior.....40

Figura 2.4. Distribuição de frequência por classes de tamanho dos tubarões cabeça-chata machos (M), em preto, e fêmeas (F), em cinza, capturados na costa da RMR, entre 2004 e 201447

Figura 2.5. Modelos de regressão linear entre comprimento total (C_T) e a) comprimento furcal (C_F), b) comprimento precaudal (C_P), c) comprimento interdorsal (C_I), e d) regressão polinomial entre C_T e peso total (P_T). Os pontos azuis e vermelhos representam tubarões machos e fêmeas, respectivamente47

Figura 2.6. Relações entre o comprimento total (C_T) e a) comprimento do cláster (C_C), b) comprimento do testículo esquerdo (C_{TEE}), c) comprimento do testículo direito (C_{TED}), d) largura do ovário (L_O), e) largura da glândula oviducal esquerda (L_{GOE}), f) largura da glândula oviducal direita (L_{GOD}), g) largura do útero esquerdo (L_{UE}) e h) largura do útero direito (L_{UD}). As linhas pontilhadas azuis em a), b) e c) representam o tamanho de maturação dos machos; e vermelhas em d), e), f), g) e h) representam o tamanho de maturação das fêmeas.....49

Figura 2.7. Raios X das nadadeiras caudais dos tubarões a) T1 e b) T2. As posições dos respectivos ângulos das curvaturas lordóticas (α) e cifóticas (β) também estão representadas, sendo em a) $\alpha = 46^\circ$ e $\beta = 24^\circ$, e em b) $\alpha = 56^\circ$ e $\beta = 43^\circ$51

Figura 2.8. Raio X da primeira nadadeira dorsal do T2 mostrando a ceratotrichia sem nenhuma deformação aparente	51
Figura 2.9. Nadadeira caudal dissecada do T2 com o detalhe (*) para a fusão entre os discos vertebrais 83 e 84.....	52
Figura 2.10 Variação trimestral da proporção de tubarões cabeça-chata machos (M) em preto e fêmeas (F) em cinza. Os números acima das barras representam o número total de tubarões capturados em cada um dos trimestres.....	53
Figura 2.11. Distribuição sazonal das variáveis ambientais a) insolação (Inso), b) radiação solar acumulada (RadSolAc), c) temperatura da superfície do mar (TSM), d) pluviosidade (Pluvio), e) direção de vento (DirVent) e f) velocidade de vento (VelVent), utilizadas para modelar a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR	55
Figura 2.12. ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR, representando os efeitos das variáveis a) ano e b) mês. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente.....	60
Figura 2.13. ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR, representando os efeitos das variáveis a) velocidade de vento, b) temperatura da superfície do mar e c) pluviosidade. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente	63

CAPÍTULO 3.

Figura 3.1. Localização dos pontos de captura (verde) e liberação (azul) dos dois tubarões cabeça-chata, Leu 1 e Leu 2, marcados na costa da RMR	84
Figura 3.2. Imagem aérea do momento da captura do segundo tubarão cabeça-chata (Leu 2). A linha vermelha corresponde a uma distância de aproximadamente 300 m entre o local de captura e a praia	85
Figura 3.3. Acomodação dos tubarões a) Leu 1 e b) Leu 2 em tanques montados no convés do B.Pq. Sinuelo, a fim de serem marcados e transportados para longe da costa.....	85
Figura 3.4. Tubarão cabeça-chata Leu 2 marcado e sendo transportado. Detalhe para a 1) marca plástica convencional e os transmissores 2) acústico e 3) por satélite.....	86
Figura 3.5. Localização das estações acústicas ao longo da costa da RMR para detecção dos tubarões marcados. Detalhe para o canal paralelo à costa ao norte da região de estudo	87

Figura 3.6. Geolocalização dos transmissores após se desprenderem de a) Leu 1 e b) Leu 2. As elipses verde e rosa correspondem aos respectivos erros das estimativas de posição	92
Figura 3.7. Variação de profundidade do Leu 2 ao longo dos 120 dias de monitoramento	93
Figura 3.8. Variação de profundidade do Leu 2 durante os primeiros 20 minutos em liberdade. A linha cinza pontilhada representa o provável momento da liberação do tubarão. A linha vermelha pontilhada indica o momento do afundamento do tubarão	94
Figura 3.9. Variação diária na utilização de a) profundidade e b) temperatura pelo Leu 1. Proporção de tempo passada em cada um dos estratos de profundidade e temperatura durante a noite (barras pretas) e durante o dia (barras brancas). As linhas de erro representam os desvios padrão	95
Figura 3.10. Trajetória do tubarão cabeça-chata Leu 1 marcado na costa da RMR, estimada com o modelo do filtro de Kalman sem correção de TSM. O círculo verde e o triângulo laranja representam a liberação do tubarão e a localização do pop-up, respectivamente. Os meses de cada uma das localizações está representado pela escala de cores. As áreas sombreadas representam o erro da estimativa do algoritmo	96
Figura 3.11. Temperatura média da superfície do mar na costa brasileira para o período entre 19 e 26 de agosto de 2012. A escala de cor representa a temperatura em graus Celsius, também representada pelas isolinhas pretas	97
Figura 3.12. Utilização de profundidade e temperatura pelo tubarão Leu 1. As faixas representativas correspondem ao comportamento de mergulho do tubarão durante o período de monitoramento na costa do Brasil. A escala de cor representa a temperatura da superfície do mar (°C). A linha horizontal pontilhada representa a isóbata dos 60 m da quebra da plataforma continental. O primeiro painel superior representa o ciclo diário, e.g. dia (branco) e noite (preto). O próximo painel superior corresponde ao ciclo lunar, onde os retângulos pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A região sombreada representa o período em que a temperatura de superfície do mar diminui bruscamente	98

Figura 3.13. Modelo UKFSST final da movimentação do tubarão Leu 1. Os pontos azul e rosa representam as localizações de liberação e pop-up, respectivamente. O perfil batimétrico e os meses correspondentes de cada geolocalização estão representados pelas escalas de cor. As linhas tracejadas laranjas representam o modelo do filtro de Kalman com correção de temperatura da superfície do mar, enquanto que as linhas sólidas azuis representam a trajetória mais provável após as correções de utilização de hábitat oceânico. As áreas sombreadas em vermelho representam os intervalos de confiança das posições do modelo. (*) Entrada no estuário do rio Maraú em 26 de setembro	99
Figura 3.14. Regressão linear entre a taxa de movimentação do Leu 1 e o número de dias entre as geolocalizações	100
Figura 3.15. GAM representando os efeitos de a) tempo na superfície e b) profundidade máxima de mergulho. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente	105
Figura 3.16. Trajetória representativa de utilização vertical pelo tubarão cabeça-chata durante o monitoramento. A escala de cor informa a proporção de tempo passada em cada estrato de profundidade. Acima da figura, a primeira barra horizontal informa o ciclo lunar, onde os retângulos completamente pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A segunda barra horizontal gradual com pequenas divisões representa o ciclo diário, e.g. dia (quadrados brancos) e noite (quadrados pretos). O painel superior representa o resultado da análise SMWGA. Abaixo da imagem, os retângulos pretos e brancos representam o comportamento transiente e residente, respectivamente	106
Figura 3.17. Trajetória representativa de utilização de temperatura pelo tubarão cabeça-chata Leu 1, durante o monitoramento. A escala de cor informa a proporção de tempo passada em cada estrato de temperatura. Acima da figura, a primeira barra horizontal informa o ciclo lunar, onde os retângulos completamente pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A segunda barra horizontal gradual com pequenas divisões representa o ciclo diário, e.g. dia (quadrados brancos) e noite (quadrados pretos). O painel superior representa o resultado da análise SMWGA. Abaixo da imagem, os retângulos pretos e brancos representam o comportamento transiente e residente, respectivamente	107

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2.

- Tabela 2.1.** Descrição das variáveis espaço-temporais e ambientais utilizadas para analisar os padrões de ocorrência de tubarões cabeça-chata, incluindo o nome das variáveis explicativas (Variável), as abreviações utilizadas nos modelos (Abreviação), o tipo da variável (Tipo) e suas respectivas descrições (Descrição)44
- Tabela 2.2.** Resultados das regressões lineares e exponenciais entre as medidas de comprimento (C_F , C_P e C_I) e peso (P_T), e o comprimento total (C_T) dos tubarões cabeça-chata capturados na RMR, para ambos os sexos combinados (Geral) e para cada um dos sexos separados.....46
- Tabela 2.3.** Aspectos reprodutivos dos tubarões cabeça-chata capturados na costa da RMR, incluindo o sexo, número total de espécimes capturados (N), estágio de maturação (Est. Mat.), as variações de comprimento total (C_T), peso total (P_T), comprimento do clássper (C_C), comprimento dos testículos (C_{TE}), largura do ovário (L_O), largura da glândula oviducal (L_{GO}) e largura do útero (L_U).....49
- Tabela 2.4.** Concentração média ($ng \cdot g^{-1}$) dos congêneres de bifenilas policloradas (PCB) no músculo dos tubarões cabeça-chata T1 e T2, capturados na RMR52
- Tabela 2.5.** Concentração média ($ng \cdot g^{-1}$) dos pesticidas orgânicos (OCP) encontrados no músculo dos tubarões cabeça-chata T1 e T2, capturados na RMR53
- Tabela 2.6.** Comparação entre as abordagens utilizando GAM e ZIGAM para modelar a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa de Recife. As variáveis explicativas (Variáveis) e os seus respectivos valores de $\log E$, AIC, $\Delta_i(AIC)$ e $w_i(AIC)$ estão representados56
- Tabela 2.7.** Sumário das análises de correlação entre as possíveis variáveis explicativas ambientais. São apresentados os respectivos resultados da estatística t (t), os graus de liberdade (gl.), o valor de p (p), os limites inferiores (LI) e superiores (LS) de 95% dos intervalos de confiança para os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e Spearman (s)56

Tabela 2.8.1. Processo de seleção das variáveis para o ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representadas a porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$	58
Tabela 2.8.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis ao ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explica (var.) e o valor de p (p).....	59
Tabela 2.8.3. ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para as variáveis contínuas e dos valores de p (p) correspondentes	59
Tabela 2.9.1. Processo de seleção das variáveis para o ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representadas a porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$	61
Tabela 2.9.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis ao ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).....	62
Tabela 2.9.3. ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para variáveis contínuas, além dos valores de p (p) correspondentes	62

CAPÍTULO 3.

Tabela 3.1. Processo de seleção das variáveis para o GAM do tempo passado na superfície do mar, com indicação da porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$	101
--	-----

Tabela 3.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no GAM do tempo passado na superfície do mar. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).....102

Tabela 3.3. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância total (var.) e o valor de p (p).....102

Tabela 3.4. Processo de seleção das variáveis para o GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão representadas a porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$ 103

Tabela 3.5. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).....104

Tabela 3.6. GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para as variáveis contínuas, e dos valores de p (p) correspondentes104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolos	Identificação
RMR	Região Metropolitana do Recife
ISAF	International Shark Attack File
ITH	Interações entre tubarões e humanos
CEMIT	Comitê Estadual de Monitoramento de Incidentes com Tubarões
PROTUBA	Projeto de Pesquisa e Monitoramento de Tubarões no Estado de Pernambuco
DEPAq	Departamento de Pesca e Aquicultura
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
B.pq.	Barco de pesquisa
LOP	Laboratório de Oceanografia Pesqueira
C _T	Comprimento total
C _F	Comprimento furcal
C _P	Comprimento precaudal
C _I	Comprimento interdorsal
C _C	Comprimento do cláspes
P _T	Peso total
C _{TEE}	Comprimento do testículo esquerdo
C _{TED}	Comprimento do testículo direito
L _O	Largura do ovário
L _{GOE}	Largura da glândula oviducal esquerda
L _{GOD}	Largura da glândula oviducal direita
L _{UE}	Largura do útero esquerdo
L _{UD}	Largura do útero direito
R ²	Coefficiente de determinação
IR	Índice de repleção
T1	Primeiro tubarão cabeça-chata apresentando deformações na nadadeira caudal

T2	Segundo tubarão cabeça-chata apresentando deformações na nadadeira caudal
PCB	Bifenilas policloradas
Σ PCB	Somatório dos congêneres de bifenilas policloradas
OCP	Pesticidas orgânicos
Σ OCP	Somatório dos congêneres de pesticidas orgânicos
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
CPUE	Captura por unidade de esforço
GAM	Modelos aditivos generalizados
ZIGAM	Modelos aditivos generalizados zero-inflados
gl.res.	Graus de liberdade dos resíduos
var.res.	Variância residual
var.	Variância explicada
Coef.est.	Coeficiente de estimação das variáveis categóricas dos modelos
Err.pad.	Erro padrão das variáveis categóricas dos modelos
z	Valor da estatística z das variáveis categóricas dos modelos
gl.ef.	Graus de liberdade efetivos das variáveis contínuas dos modelos
gl.ref	Graus de liberdade de referência das variáveis contínuas dos modelos
logE	Coeficientes aproximados de margem logarítmica utilizando o método de Laplace
AIC	Critério de informação de Akaike
$\Delta_i(\text{AIC})$	Diferença entre o valor de AIC de um dos modelos candidato e o menor valor AIC entre todos
$w_i(\text{AIC})$	Peso de Akaike
ANOVA	Análise de variância
s	Coeficiente de correlação de Spearman
r	Coeficiente de correlação de Pearson
t	Valor da estatística t para os testes de correlação de Pearson e Spearman

LI	Limite inferior de 95% dos intervalos de confiança para os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman
LS	Limite superior de 95% dos intervalos de confiança para os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman
χ^2	Valor de Chi-quadrado
gl.	Graus de liberdade
p	p-valor do teste estatístico
D	Valor estatístico do teste de Kolmogorov-Smirnov
AparPes	Aparelho de pesca
AreaPes	Área de pesca
FaseLun	Fase lunar
Pluvio	Pluviosidade
Inso	Insolação
RadSolAc	Radiação solar acumulada
VelVent	Velocidade de vento
DirVent	Direção de vento
CicloDia	Ciclo diário (dia e noite)
ModMov	Modo de movimentação do tubarão
BV	Área de pesca compreendendo as praias de Boa Viagem e Piedade
PA	Área de pesca compreendendo a praia do Paiva
Leu 1	Primeiro tubarão cabeça-chata marcado com transmissores satélite e acústico
Leu 2	Segundo tubarão cabeça-chata marcado com transmissores satélite e acústico
TPP	Porcentagem de tempo por estrato de profundidade
TPT	Porcentagem de tempo por estrato de temperatura
TMP	Trajectoria mais provável
PMM	Profundidade máxima de mergulho
TNS	Tempo na superfície
SMWGA	Análise de Split Moving Window Gradient Analysis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
1.2. A PROBLEMÁTICA DAS INTERAÇÕES ENTRE TUBARÕES E HUMANOS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE	21
1.3. JUSTIFICATIVA.....	22
1.4. OBJETIVOS	23
1.5. REFERENCIAL TEÓRICO	23
1.6. METODOLOGIA DE CAPTURA DOS TUBARÕES	25
1.7. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
REFERÊNCIAS	28

2. CAPÍTULO 1. OCORRÊNCIA E BIOLOGIA DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA NA COSTA DA RMR

2.1. INTRODUÇÃO	33
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.2.1. Biologia	37
2.2.2. Análises das alterações morfológicas.....	38
2.2.3. Padrões de ocorrência.....	41
2.2.4. Análises estatísticas e modelagem	42
2.3. RESULTADOS.....	45
2.3.1. Esforço de pesca e composição das capturas.....	45
2.3.2. Biologia	45
2.3.3. Análises das alterações morfológicas.....	50
2.3.4. Padrões de ocorrência.....	53
2.4. DISCUSSÃO.	64
2.5. CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.	69

3. CAPÍTULO 2. MOVIMENTAÇÃO DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA NA COSTA BRASILEIRA

3.1. INTRODUÇÃO	80
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	83
3.2.1. Captura e marcação	83
3.2.2. Telemetria acústica.....	86
3.2.3. Telemetria por satélite	87
3.3. RESULTADOS.....	91
3.3.1. Pop-up e transmissão dos dados.....	91
3.3.2. Movimentação vertical e horizontal.....	93
3.4. DISCUSSÃO	108
3.5. CONCLUSÃO	111
REFERÊNCIAS	111

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....117

APÊNDICE I.....	118
APÊNDICE II	119
APÊNDICE III.....	120

1. INTRODUÇÃO GERAL



Tubarão cabeça-chata vivo sendo transportado na costa de Recife.

1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento foi organizado em capítulos, de maneira a buscar uma melhor abordagem dos objetivos e resultados do trabalho. Sendo assim, o presente capítulo traz uma introdução geral ao tema do trabalho, bem como uma descrição detalhada da área de estudo e da metodologia utilizada para capturar os tubarões, além de uma contextualização sobre a problemática dos incidentes envolvendo tubarões e humanos ocorridos na Região Metropolitana do Recife (RMR).

Os principais resultados do trabalho estarão descritos nos capítulos 2 e 3. O capítulo 2 aborda a biologia reprodutiva e a dieta dos tubarões cabeça-chata capturados ao longo da RMR, além de investigar as alterações morfológicas apresentadas por dois espécimes. Nesse capítulo é analisada ainda a dinâmica de ocorrência da espécie na região de acordo com variáveis espaço-temporais e ambientais. No capítulo 3 é estudada a movimentação horizontal e vertical de tubarões cabeça-chata capturados e marcados em Recife utilizando transmissores acústicos e por satélite. Um estudo complementar foi ainda desenvolvido com o objetivo de relacionar os padrões de abundância das espécies de tubarão potencialmente perigosas com a distribuição das ocorrências de interações entre humanos e tubarões na costa da RMR, no intuito de compreender as possíveis relações entre ambos os processos, cujo resumo do respectivo artigo científico está disponível no Apêndice III. Finalmente, no capítulo 4 são apresentadas as considerações finais do trabalho.

Como resultado deste estudo foram escritos os seguintes trabalhos científicos:

1. “Occurrence, biology and movements of the bull shark, *Carcharhinus leucas*, off northeastern Brazil”, submetido para publicação à revista PLOS ONE (Apêndice I);
2. “Spinal deformities in free-ranging bull sharks, *Carcharhinus leucas*, from the western South Atlantic Ocean”, submetido para publicação à revista Journal of Applied Ichthyology (Apêndice II);
3. “Inferring trends and linkages between shark abundance and shark-human interactions for shark hazard mitigation improvement”, submetido para publicação à revista Marine and Freshwater Research (Apêndice III).

1.2. A PROBLEMÁTICA DAS INTERAÇÕES ENTRE TUBARÕES E HUMANOS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

A RMR (7°45'S, 34°49'O; 8°25'S, 34°57'O) está localizada em uma faixa de aproximadamente 75 km do litoral nordeste brasileiro no Estado de Pernambuco, e compreende um total de 14 municípios dos quais oito estão localizados no litoral, e.g. Ilha de Itamaracá, Igarassu, Paulista, Olinda, Recife, Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca. Essa região é famosa nacional e internacionalmente por uma elevada ocorrência de incidentes com tubarões, iniciados a partir do começo da década de 1990. Um total de 60 interações entre tubarões e humanos (ITH), envolvendo surfistas e banhistas, aconteceram na RMR entre junho de 1992 e março de 2015 com uma taxa de mortalidade de 40%. Os municípios envolvidos nos incidentes estão representados, em ordem decrescente de importância, por Recife (45,0% dos casos), Jaboatão dos Guararapes (35,0%), Cabo de Santo Agostinho (10,0%), Olinda (6,6%), Paulista (1,7%) e Goiana (1,7%). A maioria das ITH aconteceu nas praias de Boa Viagem, em Recife (40,0% dos incidentes), e de Piedade, em Jaboatão dos Guararapes (28,3%) (CEMIT, 2015).

Apesar da intensa utilização das praias da RMR desde o início da década de 1950, nenhuma ocorrência de ITH havia sido oficialmente registrada na região até o ano de 1992, tendo se verificado somente casos esporádicos não confirmados, de forma que algumas hipóteses foram levantadas para explicar o aumento anormal da ocorrência desse tipo de incidente na região. Entre elas, a construção e intensificação das atividades do complexo portuário de Suape, localizado ao sul da RMR, teria sido o principal responsável, tendo causado importantes alterações no ecossistema estuarino e marinho local e provavelmente atraindo mais tubarões até a costa (HAZIN; BURGESS; CARVALHO, 2008). De fato, esses animais costumam ser atraídos por embarcações (BALDRIDGE, 1988) devido aos sons de baixa frequência que são emitidos por seus motores (ARVESON & VENDITTIS, 2000; MYRBERG, 2001) e pela eventual disponibilidade de alimento (MCCORD & LAMBERTH, 2009), sendo frequentemente encontrados em regiões portuárias (COPPLESON, 1958). Além disso, acredita-se que uma provável população local de tubarões cabeça-chata, que utilizava a região afetada pela construção do porto, teria migrado seguindo a direção norte das correntes marinhas predominantes (LIRA et al., 2010) e sendo atraídos pelo despejo de efluentes não tratados no rio Jaboatão pelo Matadouro Municipal de Jaboatão dos Guararapes (Maranhão Comércio de Carne Ltda.), incluindo vísceras,

ossos e sangue dos animais abatidos (HAZIN; BURGESS; CARVALHO, 2008). Entretanto, os incidentes continuaram sendo registrados na região mesmo após o encerramento das atividades desse matadouro em Março de 2005.

A partir do início de suas atividades em maio de 2004, o Projeto de Pesquisa e Monitoramento de Tubarões no Estado de Pernambuco (PROTUBA), instituído a partir da criação do Comitê Estadual de Monitoramento de Incidentes com Tubarões - CEMIT (Decreto lei nº 26.729, de 17 de maio de 2004), desenvolvido pelo Departamento de Pesca e Aquicultura (DEPAq) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em parceria com o Instituto Oceanário de Pernambuco, e financiado pelo Governo do Estado de Pernambuco, através da Secretaria de Defesa Social, teve como objetivo principal coletar informações biológicas importantes para subsidiar e mitigar o problema das ITH ocorridas na RMR, com o mínimo de interferência ecológica possível (HAZIN & AFONSO, 2013). Esse projeto foi aprovado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade do Ministério do Meio Ambiente sob o número de registro 15083-8, cuja captura e manuseio dos tubarões foram aprovados e conduzidos em concordância com as recomendações do Regimento da Comissão de Ética da Utilização de Animais da Universidade Federal Rural de Pernambuco (número de licença 041/2009; número de protocolo 23082.009679/2009 D18). As operações de pesca foram realizadas a bordo do barco de pesquisa (B.Pq.) Sinuelo na forma de cruzeiros de pesca semanais, geralmente iniciados na quinta-feira e finalizados na terça-feira da semana seguinte, de maneira a incluir os finais de semana, que correspondem ao período em que se espera uma maior quantidade de banhistas na área de risco.

1.3. JUSTIFICATIVA

Por ser uma das espécies envolvidas nos incidentes ocorridos na RMR, e devido ao seu papel ecológico importante como predador de topo, o tubarão cabeça-chata foi escolhido como o objeto de estudo do presente trabalho. Uma melhor compreensão a respeito da ecologia dessa espécie será importante para se reduzir a taxa de ocorrência de interações entre tubarões e humanos na região, além de contribuir com o conhecimento científico a respeito dessa espécie, importante para a manutenção do equilíbrio do ecossistema marinho.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo geral desse estudo consistiu em fornecer informações importantes sobre a bioecologia dos tubarões cabeça-chata em uma região onde pouco se sabe sobre a espécie. Visando a compreender os aspectos da bioecologia dos tubarões cabeça-chata capturados no âmbito do PROTUBA, os objetivos específicos do trabalho compreenderam:

- (a) Descrever a estrutura populacional dos *C. leucas* capturados na costa da RMR pelo PROTUBA;
- (b) Estudar os aspectos da biologia dos tubarões cabeça-chata capturados em Pernambuco, como a sua reprodução, dieta e os níveis de poluentes orgânicos presentes nos tecidos de animais que apresentaram alterações morfológicas;
- (c) Analisar a abundância relativa dos tubarões cabeça-chata na costa da RMR, desde o início das atividades do PROTUBA, e o possível efeito de uma série de variáveis espaço-temporais e ambientais;
- (d) Identificar, pela primeira vez no Oceano Atlântico Sul Ocidental, os padrões de movimentação do tubarão cabeça-chata utilizando telemetria satélite e acústica.

1.5. REFERENCIAL TEÓRICO

Os tubarões e raias pertencem a um dos mais antigos grupos de peixes os quais estão incluídos na classe Chondrichthyes e subclasse Elasmobranchii, tendo surgido pela primeira vez no registro fóssil durante o período Siluriano inferior ou Ordoviciano superior na era Paleozoica, há cerca de 420-450 milhões de anos (BALLANTYNE & ROBINSON, 2011). Os elasmobrânquios modernos, por sua vez, tiveram origem após o evento de irradiação adaptativa conhecido como “A Revolução dos Neoseláceos” (COMPAGNO, 1999), ocorrido durante a era

Mesozoica (240-65 milhões de anos), e constituem um grupo monofilético (NAYLOR et al., 2005). Este grupo corresponde aos representantes atuais dos primeiros peixes com mandíbula, e dividem-se entre cerca de 1.000 espécies atualmente conhecidas e distribuídas entre 48 famílias, com notáveis diferenças morfológicas entre si (BALLANTYNE & ROBINSON, 2011). As cerca de 540 espécies atuais de tubarões, por sua vez, estão divididas nas superordens Galeomorphii, que compreende as ordens Lamniformes, Carcharhiniformes, Orectolobiformes e Heterodontiformes; e Squalomorphii que inclui as ordens Squaliformes, Pristiophoriformes, Squatiniformes, Hexanchiformes e o gênero *Echinorhinus*, anteriormente incluído em Squaliformes, mas atualmente visto como uma nova ordem (NAYLOR et al., 2012).

Diferentemente dos Actinopterygii, o endoesqueleto dos elasmobrânquios é cartilaginoso e eles não possuem opérculo. Além disso, devido à ausência de bexiga natatória, esses animais conseguem manter a sua flutuabilidade a partir de uma grande quantidade de gordura armazenada em um fígado de grande tamanho, e da presença de solutos orgânicos de baixa densidade (ureia e metil-aminas) em altas concentrações, os quais são responsáveis por reduzir a densidade de vários fluídos corporais, tornando a densidade plasmática e da maioria dos tecidos menor do que a da água do mar (BALLANTYNE & ROBINSON, 2011). Dentre as características sinapomórficas dos tubarões podemos ressaltar a presença de cinco a sete fendas branquiais localizadas lateralmente à cabeça; a presença de suspensão anfistílica entre as maxilas, onde o palato-quadrado e o hiomandibular se articulam com o neurocrânio (ao invés de estarem fundidos); nadadeiras peitorais não fundidas à cabeça e a presença da glândula retal (COMPAGNO, 1999).

Com exceção de poucas espécies planctônicas de grande porte que filtram passivamente o seu alimento enquanto nadam como no caso do tubarão baleia, *Rhincodon typus*, e do tubarão peregrino, *Cetorhinus maximus*, ou que possuem características craniais que lhes permitem expandir sua cavidade bucal e aprisionar o alimento de maneira ativa como o tubarão boca-grande, *Megachasma pelagios*, e que atingem comprimentos totais máximos de aproximadamente 20 m (JOUNG et al., 1996), 9 m (PARKER & STOTT, 1965) e >5 m (COMPAGNO, 1990) respectivamente, a maioria das espécies de tubarões ocupam os níveis superiores das redes tróficas nos ecossistemas onde ocorrem, consumindo grandes quantidades da energia disponível (CORTÉS, 1999) e sendo, por isso, considerados um dos mais bem sucedidos grupos de vertebrados do ponto de vista evolutivo (CASTRO, 1985). De uma maneira geral, os

elasmobrânquios caracterizam-se por possuírem um ciclo de vida longo, com maturação tardia e baixa fecundidade (PRATT & CASEY, 1990; GARCIA; LUCIFLORA; MYERS; 2008), de modo que a sua baixa resiliência implica em uma maior vulnerabilidade à sobrepesca, a qual pode vir a alterar o tamanho e os parâmetros de suas populações em resposta a mudanças na abundância das espécies (STEVENS et al., 2000). Apesar da atividade pesqueira se caracterizar por ser a principal ameaça à sobrevivência desses animais (BORNATOWSKI; BRAGA; VITULE; 2014), outros fatores tais como a degradação de habitat, poluição e mudanças climáticas também são responsáveis por afetar as populações de tubarões (SIMPENDORFER et al., 2011), potencialmente implicando significativas alterações estruturais nos ecossistemas marinhos. Por exemplo, a redução na abundância de predadores de topo como os tubarões pode implicar indiretamente o aumento da mortalidade de espécies exploradas pela pesca (SCHEFFER; CARPENTER; YOUNG; 2005; MYERS et al., 2007), devido ao aumento das populações de consumidores intermediários causado por uma menor pressão predatória (HEITHAUS et al., 2008; REZENDE et al., 2009).

Entre todas as espécies de tubarões atualmente conhecidas, apenas um pequeno número estiveram envolvidas em incidentes com humanos, e somente cerca de uma dúzia destas são consideradas como realmente perigosas ao homem (ISAF, 2015). Entre essas espécies, classificadas pelo International Shark Attack File (ISAF) como espécies potencialmente agressivas, podemos destacar o tubarão branco (*Carcharodon carcharias*), o tubarão cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*) e o tubarão tigre (*Galeocerdo cuvier*) como os principais responsáveis pela grande maioria dos incidentes provocados e não provocados envolvendo seres humanos em todo o mundo (BURGESS, 2011). As duas últimas têm sido as principais envolvidas nas interações com seres humanos ocorridas ao longo de uma pequena faixa de litoral da RMR a partir do ano de 1992 (GADIG & SAZIMA, 2003; HAZIN; BURGESS; CARVALHO; 2008).

1.6. METODOLOGIA DE CAPTURA DOS TUBARÕES

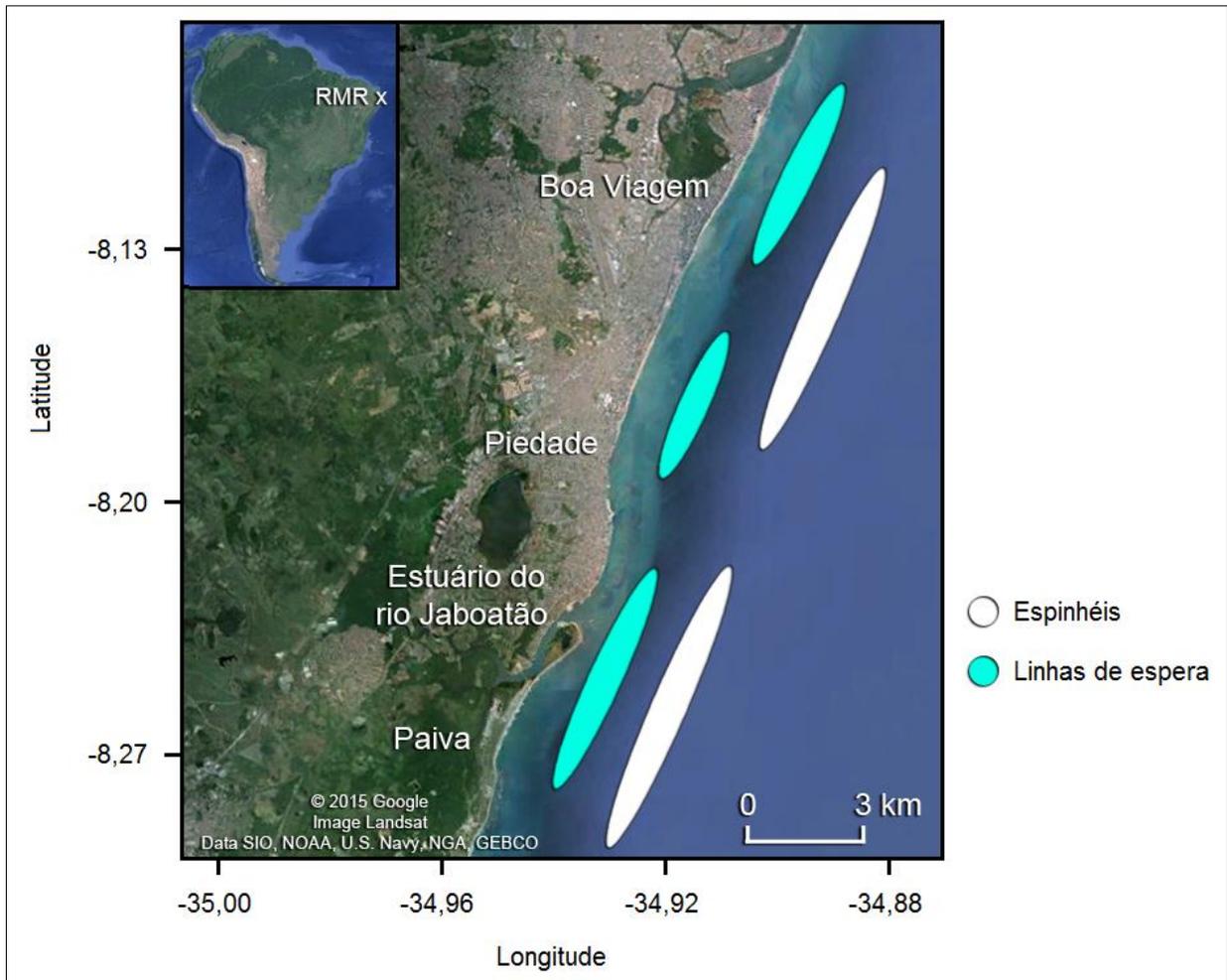
Para a captura dos tubarões, foram utilizados dois espinhéis de fundo e 23 linhas de espera como aparelhos de pesca. O espinhel é constituído por uma linha principal de poliamida multifilamento de 6 mm de diâmetro e 4 km de comprimento, segmentada em 4 partes iguais (samburás) cada uma contendo 25 linhas secundárias, as quais são compostas por um cabo de

poliamida monofilamento, com 3 mm de diâmetro e 8 m de comprimento, e um estropo de aço com 2 m conectado a um destorcedor e um anzol circular 17/0 na extremidade, totalizando um esforço de 100 anzóis por espinhel. Todas as linhas secundárias possuem boias circulares no início do estropo, de maneira a manter os anzóis suspensos na coluna d'água. As linhas de espera são compostas por uma estrutura semelhante à das linhas secundárias do espinhel, contendo dois anzóis cada e também permanecendo suspensos na água por meio de uma boia circular. Foram utilizadas como isca moreias do gênero *Gymnothorax*.

Os espinhéis foram lançados a aproximadamente 2-3 km da costa, dispostos de forma paralela à praia, a uma profundidade média de 14,08 m ($\pm 4,32$ m), enquanto que as linhas de espera foram lançadas mais próximas da praia, a uma distância < 1 km da costa e profundidade média de 8,31 m ($\pm 2,93$ m). A área de estudo foi subdividida em duas áreas de pesca, e.g. BV, que compreendeu as praias de Boa Viagem e Piedade; e PA, correspondendo à praia do Paiva, nas quais o esforço de pesca foi distribuído em um espinhel e 13 linhas de espera (esforço = 126 anzóis) em BV, e um espinhel e 10 linhas de espera (esforço = 120 anzóis) em PA (Fig. 1.1). O tempo de imersão médio foi de $14,37 \pm 2,20$ horas, com o aparelho de pesca sendo lançado no final da tarde e recolhido cedo pela manhã no dia seguinte.

Os tubarões das espécies consideradas potencialmente agressivas (BURGESS, 2011) eram acomodados em um tanque montado no convés do Barco de pesquisa (B.pq.) Sinuelo assim que o animal era embarcado, visando a facilitar os procedimentos de marcação e realizar o transporte do tubarão para fora da área de risco (AFONSO & HAZIN, 2014). Um tecido escuro foi sempre utilizado em cima dos olhos dos tubarões a fim de reduzir o estresse causado pelos procedimentos, e uma mangueira contendo um fluxo de água do mar de baixa intensidade foi inserida na sua boca para facilitar a respiração. Enquanto a embarcação se deslocava para longe da costa, onde o animal seria liberado, o tubarão tinha o sexo verificado e diversas medidas biológicas tiradas (e.g. comprimentos total, furcal, precaudal e interdorsal). O nível de maturação sexual dos machos foi determinado a partir do grau de calcificação dos cláspes e do nível de rotação a partir da base. Os tubarões foram marcados com uma marca plástica convencional contendo um número individual de identificação, informação de recompensa por devolução e telefone para contato. Além disso, transmissores acústico e via satélite foram inseridos na secção mediana da primeira nadadeira dorsal e amostras de sangue e tecido (DNA) foram retiradas para serem posteriormente analisadas. Os animais que não sobreviveram ao aparelho de pesca foram

encaminhados ao laboratório de oceanografia pesqueira (LOP) da UFRPE, para realizar estudos de biologia reprodutiva e análise de conteúdo estomacal.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2015)

Figura 1.1. Área de estudo e disposição dos aparelhos de pesca. Detalhe da configuração espacial dos equipamentos de pesca lançados paralelamente à costa nas respectivas áreas de pesca ao longo da Região Metropolitana do Recife (RMR).

1.7. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreendeu uma faixa de aproximadamente 20 km do litoral da RMR, incluindo as praias de Boa Viagem, Piedade e Paiva, as quais totalizam cerca de 85% das ITH ocorridas na região (CEMIT, 2015). Essa área está sob a influência do estuário de Barra de Jangada, composto pelos rios Jaboatão e Pirapama, cujo volume e concentração de nutrientes sofre uma variação anual de acordo com o regime de chuvas e a utilização humana (NORIEGA

& ARAÚJO, 2011). Atividades antrópicas potencialmente capazes de inserir nutrientes e poluir os estuários da região incluem o despejo de esgoto não tratado, o cultivo da cana-de-açúcar, a pecuária, a erosão do solo e a industrialização (NORIEGA & ARAÚJO, 2009).

As praias de Boa Viagem e Piedade caracterizam-se por serem ambientes altamente urbanizados e impactados pela constante presença humana, responsável por causar acentuados processos erosivos os quais demandam intervenções emergenciais para conter o avanço do mar (ROLLNIC & MEDEIROS, 2006). Existe ainda um canal paralelo à linha de costa nessa região, cuja borda externa se inicia na praia de Piedade, onde o arrecife é mais estreito, e chega a ficar emerso em alguns pontos durante a maré seca (ROLLNIC & MEDEIROS, 2013). Deste ponto se estende-se até a praia de Boa Viagem e do Pina, com uma profundidade média em torno de 6,5 m e aproximadamente 437 m de largura (HAZIN & AFONSO, 2013), conferindo uma maior complexidade de hábitat a essa região, em comparação com a praia do Paiva (AFONSO; ANDRADE; HAZIN; 2014).

A hidrodinâmica na região é influenciada principalmente pelo regime sazonal de ventos e pela força da maré, sofrendo alterações devido às variações na morfologia costeira, e.g. a presença dos recifes, e de acordo com a direção predominante das correntes marinhas (ROLLNIC & MEDEIROS, 2006; LIRA et al., 2010).

REFERÊNCIAS

AFONSO, A. S. & HAZIN, F. H. V. Post release survival and behavior and exposure to fisheries in juvenile tiger sharks, *Galeocerdo cuvier*, from the South Atlantic. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 454, p. 55-62, 2014.

AFONSO, A. S., ANDRADE, H. A. & HAZIN, F. H. V. Structure and Dynamics of the Shark Assemblage off Recife, Northeastern Brazil. **PLOS ONE**, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0102369>>. Acesso em: 08 out. 2014.

ARVESON, P. T. & VENDITTIS, D. J. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 1, p. 118-129, 2000.

BALDRIDGE, H. D. Shark aggression against man: beginnings of an understanding. **California Fish and Game**, v. 74, n. 4, p. 208-217, 1988.

- BALLANTYNE, J. S. & ROBINSON, J. W. Chondrichthyes: Physiology of Sharks, Skates and Rays. In: FARRELL, A. P. (Org.). **Encyclopedia of fish physiology: from genome to environment**. Academic Press, 2011. p. 1807-1818.
- BORNATOWSKI, H., BRAGA, R. R. & VITULE, J. R. S. Threats to sharks in a developing country: The need for effective and simple conservation measures. **Natureza & Conservação**, v. 12, n. 1, p. 11-18, 2014.
- BURGESS, G. H. International Shark Attack File. **Florida Museum of Natural History**. 2011. Disponível em: <<http://www.flmnh.ufl.edu/fish/Sharks/White/Decade.htm>>. Acesso em: 16 set. 2014.
- CEMIT – Comitê Estadual de Monitoramento de Incidentes com Tubarões. Secretaria de Defesa Social. **Governo do Estado de Pernambuco**. Disponível em: <<http://www.portaisgoverno.pe.gov.br/web/sds/cemit1>>. Acesso em: 25 mar. 2015.
- CASTRO, J. I. The position of sharks in Marine Biological Communities: an overview. In: COOK, S. F. (Org.). **Sharks: an inquiry into biology, behavior, fisheries, and use**. Proceedings of a conference, Portland, Oregon, USA, 1985. p. 11-17.
- COMPAGNO, L. J. V. Relationships of the Megamouth Shark, *Megachasma pelagios* (Lamniformes: Megachasmidae), with comments on its feeding habits. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report. **National Marine Fisheries Service**, v. 90, p. 357-379, 1990.
- COMPAGNO, L. J. V. Systematics and body form. In HAMLETT, W. C. (Org.). **Sharks, skates and rays: The biology of elasmobranchs fishes**. The John Hopkins University Press, 1999. p. 1-42.
- COPPLESON, V. M. **Shark Attack**. 2. ed. Sydney, 1958. p. 266.
- CORTÉS, E. Standardized diet compositions and trophic levels of sharks. **Journal of Marine Science**, v. 56, n. 5, p. 707-717, 1999.
- GADIG, O. B. F. & SAZIMA, I. A non-fatal attack by the tiger shark, *Galeocerdocuvier*, on the northeast coast of Brazil (Chondrichthyes, Carcharhinidae). **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 36, p. 119-122, 2003.
- GARCIA, V. B., LUCIFLORA, L. O. & MYERS, R. A. The importance of habitat and life history to extinction risk in sharks, skates, rays and chimaeras. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 275, n. 1630, p. 83-89, 2008.
- HAZIN, F. H. V., BURGESS, G. H. & CARVALHO, F. C. A shark attack outbreak off Recife, Pernambuco, Brazil: 1992-2006. **Bulletin of Marine Science**, v. 82, n. 2, p. 199-212, 2008.
- HAZIN, F. H. V. & AFONSO, A. S. A *green* strategy for shark attack mitigation off Recife, Brazil. **Animal Conservation**, v. 17, n. 4, p. 287-296, 2013.

- HEITHAUS, M. R., FRID, A., WIRSING, A. J. & WORM, B. Predicting ecological consequences of marine top predators declines. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 23, n.4, p. 202-210, 2008.
- ISAF – International Shark Attack File. **Florida Museum of Natural History**. 2015. Disponível em: <<http://www.flmnh.ufl.edu/fish/Sharks/sharks.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2014.
- JOUNG, S., CHEN, C., CLARK, R., UCHIDA, S. & HUANG, W. Y. P. The whale shark, *Rhincodon typus*, is a livebearer: 300 embryos found in one “megamamma” supreme. **Environmental Biology of Fishes**, v. 46, n. 3, p. 219-223, 1996.
- LIRA, L., WOR, C., HAZIN, F. H. V., JÚNIOR, H. A. C. B. & SANTOS, J. C. P. Estudo de correntes marinhas por meio do lançamento de cartões de deriva no litoral do Estado de Pernambuco, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 43, n. 1, p. 30-37, 2010.
- MCCORD, M. E. & LAMBERTH, S. J. Catching and tracking the world’s largest Zambezi (bull) shark *Carcharhinus leucas* in the Breede Estuary, South Africa: the first 43 hours. **African Journal of Marine Science**, v. 31, n. 1, p. 107-111, 2009.
- MYRBERG, A. A. The acoustic biology of elasmobranchs. **Environmental Biology of Fishes**, v. 60, p. 31-45, 2001.
- MYERS, R. A., BAUM, J. K., SHEPHERD, T. D., POWERS, S. P. & PETERSON. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. **Science**, v. 315, n. 5820, p. 1846-1850, 2007.
- NAYLOR, G. J. P., RYBURN, J. A., FEDRIGO, O. & LOPEZ, A. Phylogenetic relationships among the major lineages of modern elasmobranchs. **Reproductive Biology and Phylogeny**, v. 3, n. 1, p. 25, 2005.
- NAYLOR, G. J. P., CAIRA, J. N., JENSEN, K., ROSANA, K. A. M., STRAUBE, N. & LAKNER, C. Elasmobranch phylogeny: A mitochondrial estimate based on 595 species. In: CARRIER, J. C., MUSICK, J. A. & HEITHAUS, M. R. (Org.). **The biology of sharks and their relatives**. CRC press, 2012. p. 31-56.
- NORIEGA, C. E. D. & ARAUJO, M. Nitrogen and phosphorus loading in coastal watersheds in northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 56, p. 871-875, 2009.
- NORIEGA, C. E. D. & ARAUJO, M. Nutrient budgets (C, N and P) and trophic dynamics of a Brazilian tropical estuary: Barra das Jangadas. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 83, n. 2, p. 441-456, 2011.
- PARKER, H. W. & STOTT, F. C. Age, size and vertebral calcification in the basking shark, *Cetorhinus maximus* (Gunnerus). **Zoologische mededelingen**, v. 40, n. 34, p. 305-319, 1965.
- PRATT, H. L. & CASEY, J. G. Shark reproductive strategies as a limiting factor in directed fisheries, with a review of Holden’s method of estimating growth parameters. In: HOENING, J.

M., GRUBER, S. H., PRATT, H. L. & TANIUCHI, T. (Org.). **Elasmobranchs as living resources: advances in the biology, ecology, systematics, and the status of fisheries**. Us Department of Commerce, NOAA Technical Report NMFS 90, 1990. p. 77-109.

REZENDE, E. L., ALBERT, E. M., FORTUNA, M. A. & BASCOMPTE, J. Compartments in a marine food web associated with phylogeny, body mass, and habitat structure. **Ecology Letters**, v. 12, n. 8, p. 779-788, 2009.

ROLLNIC, M. & MEDEIROS, C. Circulation of the Coastal Waters Off Boa Viagem, Piedade and Candeias Beaches Pernambuco, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 648-650, 2006.

ROLLNIC, M. & MEDEIROS, C. Application of a probabilistic sediment transport model to guide beach nourishment efforts. **Journal of Coastal Research**, v. 65, p. 1856-1861, 2013.

SCHEFFER, M., CARPENTER, S. & YOUNG, B. Cascading effects of overfishing marine systems. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 20, n. 11, p. 579-581, 2005.

SIMPFENDORFER, C. A., HEUPEL, M. R., WHITE, W. T. & DULVY, N. K. The importance of research and public opinion to conservation management of sharks and rays: a synthesis. **Marine and Freshwater Research**, v. 62, n. 6, p. 518-527, 2011.

STEVENS, J. D. BONFIL, R., DULVY, N. K. & WALKER, P. A. The effects of fishing on sharks, rays, and chimaeras (chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems. **Journal of Marine Science**, v. 57, n. 3, p. 476-494, 2000.

2. CAPÍTULO 1. OCORRÊNCIA E BIOLOGIA DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA NA COSTA DA RMR



Tubarão cabeça-chata capturado na costa de Recife.

2.1. INTRODUÇÃO

O tubarão cabeça-chata (*Carcharhinus leucas*) pertence à família Carcharhinidae, inserida na ordem Carcharhiniformes (NAYLOR et al., 2012). Outros nomes em sinonímia para esta espécie incluem: *Carcharhinus azureus* Gilbert & Starks, 1904; *Carcharias spenceri* Ogilby, 1911; *Galeolamna (Bogimba) bogimba* Whitley, 1943; *Galeolamna greyi mckaili* Whitley, 1945; e *Carcharhinus vanrooyeni* Smith, 1958 (COMPAGNO, 1984). Esta espécie é ainda conhecida pelos nomes populares estrangeiros de bull shark (inglês), requin bouledogue (francês) e tiburón sarda (espanhol). No Brasil, essa espécie é conhecida principalmente como tubarão cabeça-chata ou tubarão touro, ou ainda pelos nomes populares de cação Sucurupóia (adultos) e cação Sucurupóia galha-preta (filhotes) no Estado da Bahia, ou boca-redonda, cação de rio, cação baiacu e pirarara nas regiões sudeste e sul (QUEIROZ & REBOUÇAS, 1995; SZPILMAN, 2004).

Esta é uma espécie de tubarão costeira e de grande porte, capaz de atingir um tamanho máximo de 4 m de comprimento total (C_T) na fase adulta (MCCORD & LAMBERTH, 2009), estando amplamente distribuída nas plataformas continentais de todos os oceanos tropicais e subtropicais do mundo (COMPAGNO, 2001). Os tubarões cabeça-chata são elasmobrânquios eurialinos, ou seja, animais marinhos capazes de utilizar diferentes habitats com grande variação de salinidade, devido a especializações fisiológicas que lhes conferem uma eficiente capacidade de osmorregulação. Tais especializações incluem a presença de transportadores iônicos nas membranas das lamelas branquiais, responsáveis por promover a entrada de Na^+ e Cl^- e excreção de HCO_3^- por transporte ativo (PILLANS et al., 2005; REILY et al., 2011). A eliminação através da glândula retal do excesso de Na^+ e Cl^- , adquiridos em decorrência da permanência em água salgada (DOWD, 2011), e a modulação hepática da produção de ureia em função de alterações na salinidade ambiental (TAM et al., 2003; ANDERSON et al., 2005), também possuem um papel importante na manutenção da homeostase plasmática dos tubarões cabeça-chata. A função dos rins, por sua vez, consiste em produzir um grande volume de urina em resposta à entrada de água por osmose quando em ambientes límnicos e facilitar a reabsorção tubular de ureia e íons Na^+ e Cl^- a fim de reduzir a perda desses osmólitos através da urina (JANECH & PIERMARINI, 2002; JANECH et al., 2006).

Os tubarões cabeça-chata possuem reprodução vivípara, de modo que os embriões se desenvolvem no interior do útero materno (JENSON, 1976). Embora seja possível que o

acasalamento também ocorra em habitats de água doce, acredita-se que este se dê preferencialmente em ambiente marinho (MONTROYA & THORSON, 1982; CLIFF & DUDLEY, 1991; COMPAGNO; DANDO; FOWLER; 2005; PILLANS et al., 2006). Os tubarões machos atingem a maturidade sexual por volta dos 157-226 cm C_T (9-15 anos de idade), sendo que as fêmeas ficam sexualmente maduras um pouco mais tarde, entre 180-230 cm C_T (10-18 anos) (COMPAGNO, 1984; BRANSTETTER & STILES, 1987; CRUZ-MARTÍNEZ; CARRARA; FUENTES; 2004). A época de parto, no hemisfério Sul, foi descrita para o período entre novembro e fevereiro (SADOWSKY, 1971), ocorrendo entre os meses de maio e julho no hemisfério Norte (SNELSON et al., 1984). Ambos os períodos, portanto, correspondendo ao final da primavera e início do verão em cada uma dessas regiões. Diferentemente do Atlântico Norte, porém, as fêmeas grávidas no Atlântico Sul não demonstraram o fenômeno de inibição alimentar (SADOWSKY, 1971). Após um período de gestação de 10-12 meses (CLARK & VON SCHMIDT, 1965; JENSON, 1976), as fêmeas grávidas entram em áreas estuarinas para dar à luz os seus filhotes (THORSON, 1972; THORSON et al., 1973), os quais nascem medindo entre 56-81 cm C_T (PATTILLO et al., 1997). Os jovens de cabeça-chata apresentam um considerável grau de fidelidade a esses habitats (HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; YEISER; HEUPEL; SIMPFENDORFER, 2008), provavelmente como uma adaptação evolutiva para evitar a predação nessa fase de vida inicial e não devido a uma incapacidade fisiológica de sobreviver em ambiente marinho (PILLANS et al., 2005), sendo o C_T uma variável importante na determinação das transições ontogenéticas de habitat (HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; STREITCH & PETERSON, 2011; WERRY et al., 2011). Existem evidências de que as fêmeas de *C. leucas* devam apresentar um maior grau de filopatria do que os machos (KARL et al., 2011, TILLET et al., 2012), assim como em outras espécies de carcharhinídeos (HUETER et al., 2005; CHAPMAN et al., 2009; PORTNOY et al., 2010).

Uma vez que os tubarões cabeça-chata utilizam ambientes costeiros como habitat preferencial (HUETER et al., 2005; CARLSON et al., 2010; DALY et al., 2014), especialmente em áreas próximas à desembocadura de rios, onde uma elevada turbidez frequentemente se associa ao fluxo de água doce (FROESCHKE et al., 2010), esta espécie se torna altamente exposta às interferências antrópicas deletérias sobre a zona costeira, tais como a degradação de habitat e a poluição (KARL et al., 2011; WERRY et al., 2011). Apesar de tubarões cabeça-chata neonatos e juvenis terem sido identificados em habitats afetados pelo desenvolvimento urbano

em larga escala, há aparentemente uma preferência (71% das detecções) pelas áreas com menor grau de impacto (WERRY et al., 2012).

A dieta dos tubarões cabeça-chata é composta geralmente por espécies bentônicas e demersais de teleósteos, raias, e outros tubarões (até da mesma espécie), mas também podendo incluir aves marinhas, tartarugas, moluscos, crustáceos e mamíferos marinhos (SNELSON; MULLIGAN; WILLIAMS; 1984; CLIFF & DUDLEY, 1991). Estudos recentes utilizando isótopos estáveis têm sugerido uma alteração ontogenética na dieta de *C. leucas*, indicando que esses tubarões possam atuar sobre diferentes níveis tróficos ao longo do seu ciclo de vida (MATICH; HEITHAUS; LAYMAN; 2010; WERRY et al., 2011). Além da diferença na composição da dieta, a força da mandíbula também varia ontogeneticamente, apresentando alometria positiva em indivíduos juvenis (73-117 cm C_T) e tornando-se isométrica nos adultos, provavelmente de maneira a conferir um melhor desempenho predatório durante a sua fase de vida inicial. Quando comparada com os valores conhecidos para outras espécies, a mandíbula dos tubarões cabeça-chata é aquela que possui uma maior força massa-específica, sendo superior à do tubarão branco ou do grande tubarão martelo (*Sphyrna mokarran*), espécies que atingem um maior C_T (HABEGGER et al., 2012).

Estudos de marcação e recaptura haviam estimado que os tubarões cabeça-chata machos devessem viver apenas cerca de 12 anos, enquanto que as fêmeas pudessem viver um pouco mais, atingindo uma idade máxima de 16 anos (THORSON & LACY, 1982). Por outro lado, trabalhos baseados em leituras de anéis de crescimento nas vértebras para aferição dos parâmetros de crescimento de von Bertalanffy estimaram uma idade máxima em torno de 22 anos para os machos, e de 24 anos para as fêmeas de *C. leucas* (BRANSTETTER & STILES, 1987). Entretanto, em um estudo ainda mais recente analisando a população de tubarões cabeça-chata do Golfo do México, foram propostas as idades máximas de 23 anos para tubarões machos e de 28 anos para as fêmeas (CRUZ-MARTÍNZES et al., 2004). Como tentativa de estimar a longevidade de *C. leucas* incorporando a variabilidade do C_T no momento do nascimento, Neer et al. (2005) utilizaram simulações Monte-Carlo como uma alternativa ao modelo de crescimento de Von Bertalanffy, e além de não terem identificado diferenças significativas entre ambos os sexos, estimaram a idade máxima para os tubarões cabeça-chata entre os 39-49 anos.

Apesar das suas causas serem ainda amplamente desconhecidas, acredita-se que a ocorrência de alterações morfológicas em tubarões de vida livre possam ter uma origem

congenita, ou vir a serem adquiridas ao longo da vida desses animais, como resultado de ferimentos, doenças ou como consequência de uma alimentação deficiente (HEUPEL; SIMPFENDORFER; BENNET; 1999). Estressores ambientais como temperatura da água do mar, salinidade e concentrações de CO₂ elevadas, podem ainda vir a causar efeitos negativos significantes ao longo da ontogenia dos tubarões, uma vez que tais fatores são também responsáveis por aumentar a probabilidade de má formação em teleósteos (EISSA et al., 2009; PIMENTEL et al., 2014). A poluição marinha, por sua vez, pode também ser responsável por deformações esqueléticas em elasmobrânquios, sendo que os seus efeitos conhecidos em teleósteos incluem deformações no crânio, nas nadadeiras, na cintura pélvica, no opérculo e nas vértebras, causando ainda a ausência de nadadeiras e curvaturas na coluna vertebral (SLOOF, 1982). Anomalias morfológicas em elasmobrânquios costumam ser letais em indivíduos recém-nascidos (ELLIS & SHACKLEY, 1997), sendo poucos os registros de indivíduos adultos apresentando tais características (MOORE, 2015). Os registros de anomalias morfológicas em elasmobrânquios incluem a ocorrência de deformações esqueléticas (HOENING & WALSH, 1983; HEUPEL; SIMPFENDORFER; BENNET; 1999; THORBURN & MORGAN, 2004), a ausência de nadadeiras (TANIUCHI & YANAGISAWA, 1987), a presença de nadadeiras adicionais (WILLIAMS, 1935; ELLIS, 2005), ocorrência de chifres cefálicos anormais (RAMIREZ-AMARO et al., 2013), bicefalia (DELPIANI et al., 2011), ausência de parte do clássper e deformações nos lobos superiores das nadadeiras caudais, como curvaturas ou ausência dessa estrutura (MOORE, 2015). Em tubarões cabeça-chata, há registros de bicefalia em embriões (WAGNER; RICE; PEASE; 2013), e a captura, no México, de uma fêmea adulta exibindo severas deformações ao longo da coluna vertebral (SHARK YEAR MAGAZINE, 2014), as quais aparentemente não demonstraram ter afetado a sobrevivência do animal.

A pesca também constitui uma ameaça à sobrevivência dos tubarões cabeça-chata, uma vez que essa espécie exibe considerável grau de fidelidade a áreas costeiras específicas (KOHLENER & TURNER, 2001; TREMAIN; HARNDEN; ADAMS; 2004; CURTIS, 2008; CARLSON et al., 2010; WERRY et al., 2012; DALY et al., 2014), podendo ser responsável por reduzir os estoques locais caso essas áreas sejam constantemente submetidas a pressão pesqueira (CLIFF & DUDLEY, 1991; WINTNER et al., 2002; O'CONNEL et al., 2007). Apesar de *C. leucas* ser uma espécie de tubarão capturada pela pesca artesanal e industrial em águas brasileiras, ela ocorre com abundância consideravelmente inferior em comparação com outras

espécies de carcharhinídeos, como *Carcharhinus porosus* e *C. acronotus* na região norte (MENEZES et al., 2005; RODRIGUES-FILHO et al., 2009), e *C. signatus* e *Prionace glauca* na região sul (AMORIM; ARFELLI; FAGUNDES; 1998; MAZZOLENI & SCHWINGEL, 1999).

No Brasil, a presença de *C. leucas* foi descrita como ocorrendo desde o litoral do Estado do Pará (0,61°S) até o litoral do estado de Santa Catarina (26,91°S) (AMORIM; ARFELLI; FAGUNDES; 1998; MAZZOLENI & SCHWINGEL, 1999; RODRIGUES-FILHO et al., 2009), tendo sido também encontrado na região insular de Abrolhos ao sul do Estado da Bahia (BORNATOWSKY et al., 2012) e em habitats de água doce, e.g. na lagoa de Cananéia no Estado de São Paulo (SADOWSKY, 1971) e no rio Amazonas, a mais de 3.000 km de distância do Oceano Atlântico (THORSON, 1972). Entretanto, devido à pequena quantidade de literatura disponível, muito pouco ainda se sabe sobre a bio-ecologia do tubarão cabeça-chata no Oceano Atlântico Sudoeste.

O objetivo desse capítulo é estudar os aspectos gerais da biologia dos tubarões cabeça-chata capturados no âmbito do Projeto de Pesquisa e Monitoramento de Tubarões no Estado de Pernambuco (PROTUBA) na costa da Região Metropolitana do Recife (RMR), bem como identificar os padrões de ocorrência dessa espécie na região de acordo com uma série de variáveis espaço-temporais e ambientais. Neste capítulo serão descritos, ainda, dois tubarões cabeça-chata adultos que apresentaram alterações morfológicas em suas nadadeiras caudais, as quais foram analisadas e tiveram suas possíveis causas investigadas.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Biologia

Os tubarões cabeça-chata tiveram o sexo determinado e as seguintes medidas de comprimento aferidas em centímetros (cm): comprimento total (C_T), furcal (C_F), precaudal (C_P) e interdorsal (C_I). Além disso, os machos tiveram o comprimento do cláspere (C_C) aferido, também em cm, e o estágio de maturação determinado por meio da análise do grau de calcificação (rigidez) do cláspere e do seu nível de rotação a partir da base, de modo que os indivíduos que apresentaram cláspere calcificado e com rotação completa foram classificados como sexualmente maduros. Os tubarões encaminhados ao LOP da UFRPE tiveram o seu peso total (P_T) determinado em quilograma (kg) e foram dissecados com o objetivo de aferir a largura e o

comprimento dos órgãos reprodutivos em milímetros (mm). Nos espécimes machos foram medidos os comprimentos dos testículos esquerdo (C_{TEE}) e direito (C_{TED}), enquanto que nas fêmeas foram medidas as larguras do ovário (L_O), das glândulas oviducais direita (L_{GOD}) e esquerda (L_{GOE}), e dos úteros esquerdo (L_{UE}) e direito (L_{UD}). A diferença entre os C_T de ambos os sexos foi investigada com o teste de Kolmogorov-Smirnov. Para analisar as relações entre C_T e C_F , C_P e C_I , foram utilizados modelos de regressões lineares, enquanto que a relação entre C_T e P_T foi investigada com um modelo de regressão exponencial devido à sua conhecida não linearidade. Todos os modelos de regressão foram realizados para ambos os sexos combinados e também para cada um dos sexos de maneira independente. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar o poder preditivo de cada um dos modelos.

Os conteúdos estomacais foram analisados, quando presentes, e identificados ao menor nível taxonômico possível. O índice de repleção (IR) foi considerado como a proporção do volume de comida em relação ao volume total do estômago, e classificado em cinco classes: 0% (estômago vazio), 25%, 50%, 75% e 100% (estômago cheio).

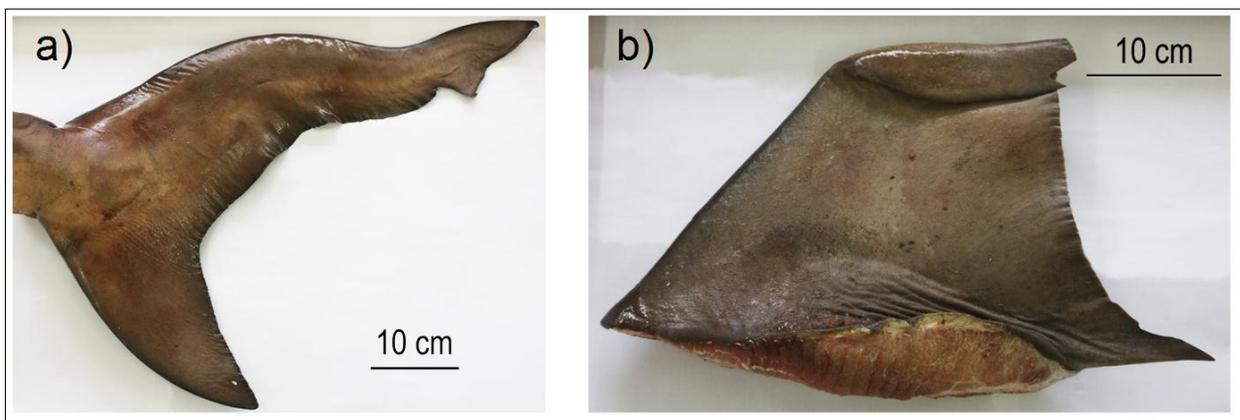
2.2.2. Análises das alterações morfológicas

Dois tubarões cabeça-chata apresentaram deformidades conspícuas de aspecto ondulado e similares, nos lobos superiores de suas nadadeiras caudais (Fig. 2.1-2.2a), facilmente identificáveis se comparadas com uma nadadeira saudável de *C. leucas* (Fig. 2.3a). O primeiro tubarão (T1), uma fêmea medindo 210 cm C_T e pesando 73 kg P_T , foi capturado no dia 23 de Fevereiro de 2014. O segundo tubarão (T2), também uma fêmea, foi capturado em 16 de Dezembro de 2014, medindo 239 cm C_T e pesando 120 kg P_T , e, além da alteração na nadadeira caudal, apresentava também uma deformação na primeira nadadeira dorsal (Fig. 2.2b).



Fonte: Dados da pesquisa

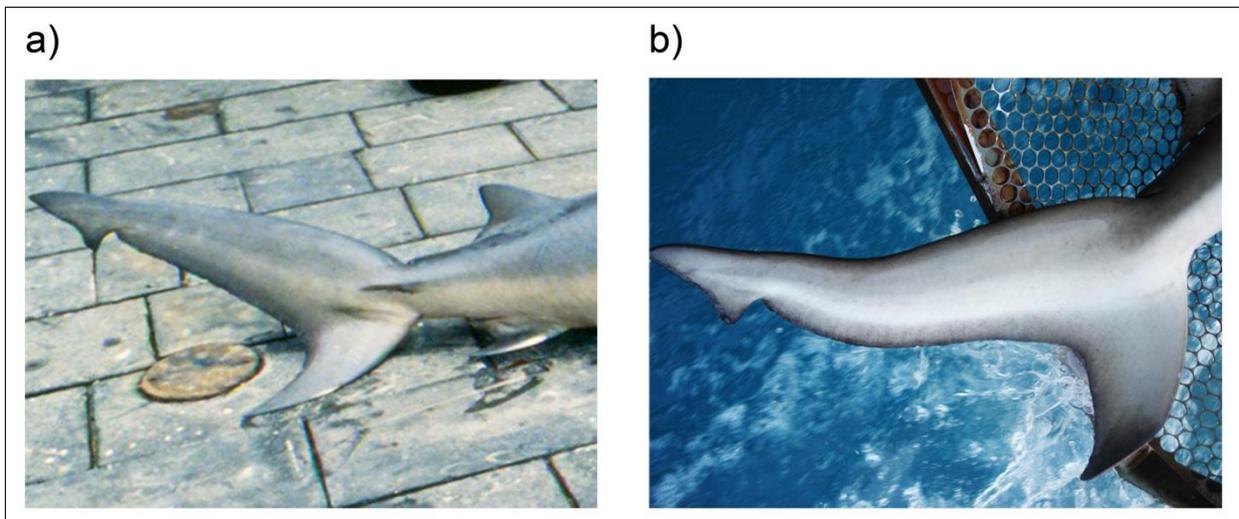
Figura 2.1. Nadadeira caudal do primeiro tubarão (T1) capturado na costa da RMR apresentando deformação no lobo superior.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.2. Nadadeira caudal (a) e dorsal (b) do segundo tubarão (T2) cabeça-chata capturado na costa da RMR exibindo alterações morfológicas.

Além desses dois tubarões, um tubarão cabeça-chata macho medindo 213 cm C_T e pesando 77,8 kg P_T havia sido anteriormente capturado pelo PROTUBA em Dezembro de 2007, apresentando também uma deformação no lobo superior de sua nadadeira caudal (Fig. 2.3b) de aspecto semelhante ao dos tubarões capturados mais recentemente. Infelizmente, devido ao longo tempo desde a sua captura, não foi possível obter material biológico referente a esse espécimen para realizar as análises que serão detalhadas a seguir.



Fonte: a) Adaptado do Google Imagens (2015); b) PROTUBA (2007)

Figura 2.3. Nadadeiras caudais de tubarões cabeça-chata a) sem deformação e b) apresentando deformação ondulatória no lobo superior.

Os tubarões foram levados ao LOP onde tiveram suas nadadeiras removidas para a realização de exames radiológicos. No hospital veterinário do departamento de Morfologia e Fisiologia Animal da UFRPE foram tiradas radiografias, em vista lateral, utilizando o equipamento analógico Meditronix (55.0 kW, 5.0 mAs; 1,2 m de ponto focal). Devido ao grande tamanho das nadadeiras não foi possível obter apenas uma imagem de toda a secção, com exceção da nadadeira dorsal do T2, sendo necessário tirar duas radiografias complementares de cada uma das nadadeiras caudais. Em seguida, as radiografias foram colocadas em um negatoscópio e fotografadas com uma câmera digital CANON Rebel XSi. As imagens finais foram obtidas com o software Adobe Photoshop 12.0, no qual as vértebras que apareciam em ambas as imagens foram utilizadas para se sobrepor as duas imagens de cada uma das nadadeiras. Os ângulos das curvaturas espinhais foram determinados com o mesmo software, ao se cruzar tangentes nos pontos de inflexão e medir a sua rotação em relação à orientação normal da coluna vertebral. As vértebras foram numeradas a partir da extremidade da cauda, para facilitar a descrição das alterações observadas. Além do mais, a nadadeira caudal do T2 foi submetida a uma dissecação para confirmação dos padrões observados nas radiografias.

Com o objetivo de identificar possíveis concentrações anormais de poluentes orgânicos nos tecidos desses tubarões, que provavelmente explicassem a origem dos fenótipos observados, amostras de músculo de aproximadamente 2,5 g foram coletadas de ambas as nadadeiras,

lioofilizadas e injetadas em um cromatógrafo a gás (Agilent Technologies, modelo 7820A) equipado com um espectrofotômetro (Agilent Technologies, modelo 5975C) para investigar a presença de bifenilas policloradas (PCB) e pesticidas orgânicos (OCP) tais como o diclorodifeniltricloroetano (DDT).

2.2.3. Padrões de ocorrência

Visando a investigar possíveis inversões temporais na proporção sexual de *C. leucas* ao longo do ano, as variações no número de tubarões cabeça-chata machos e fêmeas foram analisadas por trimestres. Os trimestres foram selecionados de acordo com o regime de chuvas ao longo do ano, estando a estação chuvosa compreendida entre os meses de março e agosto, e a estação seca entre os meses de setembro e fevereiro. Devido ao pequeno número de indivíduos capturados, e.g. menos do que cinco tubarões em alguns dos trimestres, foi utilizado o teste de Fisher (MCDONALD, 2009) para investigar a presença de alterações significativas na proporção sexual de tubarões cabeça-chata. Além disso, os valores de captura por unidade de esforço (CPUE) foram calculados para cada um dos aparelhos de pesca, e.g. espinhel e linhas de espera, em cada lance de pesca, a partir dos quais foram obtidos os valores médios e seus respectivos desvios padrão, para comparar as taxas de captura de cada um dos equipamentos.

Duas abordagens foram conduzidas a fim de examinar a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR, onde os efeitos de uma série de variáveis espaço-temporais e ambientais foram analisadas independentemente utilizando modelos aditivos generalizados (GAM) (HASTIE & TIBSHIRANI, 1990). Para tal propósito, ambos os modelos espaço-temporal e ambiental incluíram a presença/ausência de tubarões cabeça-chata como variável resposta, utilizando famílias de distribuição de erro binomiais e funções de ligação logística. O modelo ambiental incluiu fase lunar, pluviosidade, temperatura da superfície do mar (TSM), insolação, radiação solar acumulada, velocidade de vento e direção de vento como possíveis variáveis preditoras. Para o modelo espaço-temporal foram testadas as variáveis ano, mês, aparelho de pesca e área de pesca. Uma descrição completa do processo de modelagem será realizada na próxima seção.

Os dados de captura entre maio de 2004 e agosto de 2005 não foram utilizados para estas análises, devido a modificações realizadas no aparelho de pesca, visando a reduzir a captura de fauna acompanhante bem como a mortalidade dos animais capturados, as quais foram

responsáveis por influenciar significativamente a sua capturabilidade a partir de setembro de 2005 (HAZIN & AFONSO, 2013). Dessa forma, os dados de pesca compreendidos entre setembro de 2005 e dezembro de 2014 foram agregados por cruzeiro de pesca, sendo calculadas as médias a partir dos valores diários de cada uma das variáveis ambientais, correspondentes aos respectivos dias em que houve atividade de pesca. Os dados de TSM foram coletados durante o lançamento do aparelho de pesca utilizando uma ecossonda FURUNO, enquanto que os dados meteorológicos, e.g. pluviosidade, insolação, radiação solar acumulada, velocidade de vento e direção de vento, foram obtidos a partir do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC, 2014) e do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa e do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP, 2014).

2.2.4. Análises estatísticas e modelagem

Todas as análises foram conduzidas no software R versão 3.0.2 (R CORE TEAM, 2013), com significância estatística de 0,05. Para os testes de Kolmogorov-Smirnov (CONOVER, 1971) e de Fisher (FISHER, 1962), foram utilizadas respectivamente as funções `ks.test` e `fisher.test` do pacote `STATS` (VENABLES & RIPLEY, 2002). Os procedimentos de modelagem foram realizados com as funções `disgam` e `zigam` do pacote `COZIGAM` (LIU & CHAN, 2010).

Dado que o conjunto de dados continha uma grande quantidade de observações iguais a zero, referentes aos dias em que houve lance de pesca sem que nenhum tubarão fosse capturado, foi realizado um procedimento preliminar utilizando GAM e modelos aditivos generalizados zero-inflados (ZIGAM) para cada uma das variáveis explicativas candidatas independentemente, com o objetivo de verificar se o conjunto de dados deveria ser considerado como inflacionado de zeros. Para tal propósito foram comparados os valores dos coeficientes $\log E$ calculados utilizando o método de Laplace para cada um dos modelos (LIU & CHAN, 2010), onde o tipo de modelo cujo coeficiente apresentasse o maior valor seria selecionado para o procedimento de modelagem. Foi realizada ainda uma abordagem complementar utilizando o critério de informação de Akaike, AIC; as diferenças entre os valores de AIC para cada um dos modelos candidatos e o valor AIC do melhor candidato entre eles (menor valor de todos), $\Delta_i(\text{AIC})$; e os respectivos pesos de Akaike para cada um dos modelos candidatos, $w_i(\text{AIC})$ (WAGENMAKERS & FARRELL, 2004). Esta abordagem foi conduzida com a função `akaike.weights` do pacote `qpcR` (SPIESS, 2014), na qual

o modelo que apresentasse maior valor de $w_i(\text{AIC})$ entre todos os modelos candidatos seria confirmado para as análises subsequentes.

Uma descrição detalhada de todas as variáveis explicativas pode ser encontrada na Tabela 2.1. Possíveis problemas de multicolinearidade entre as variáveis ambientais foram examinados, a fim de se evitar inserir variáveis altamente correlacionadas em um mesmo modelo. Os coeficientes de correlação de Spearman (s) e de Pearson (r) (HOLLANDER & WOLFE, 1973; BEST & ROBERTS, 1975) foram calculados para cada par possível de variáveis explicativas usando a função `cor.test` do pacote `STATS` (VENABLES & RIPLEY, 2002), sendo ambas as variáveis não incluídas simultaneamente em um mesmo modelo caso o valor absoluto do intervalo de confiança para r ou o valor absoluto de s fosse maior ou igual a 0,3 (COHEN, 1988). Além disso, o logaritmo do esforço de pesca (número de anzóis) foi incluído em ambos os modelos espaço-temporal e ambiental para padronização das taxas de ocorrência, como um parâmetro “offset” da função de modelagem. Todas as variáveis contínuas, e.g. ano, mês, pluviosidade, TSM, insolação, radiação solar acumulada, velocidade de vento e direção de vento, foram modeladas utilizando funções suavizadoras, cujas dimensões dos termos suavizadores (k) foram otimizadas independentemente ao se testar uma série de modelos nos quais o valor do parâmetro k variou entre 1 e 10. Em seguida, um procedimento passo a passo foi conduzido, a fim de se testar a inclusão de novas variáveis explicativas ao modelo inicial, o qual também foi utilizado para identificar o melhor modelo final entre todos os modelos candidatos. Um novo modelo adequado, incorporando uma nova variável explicativa, foi eleito quando os seguintes critérios eram observados: I) o número de graus de liberdade efetivos da nova variável fosse maior do que 1; II) o novo modelo tivesse valores de $\log E$ e $w_i(\text{AIC})$ maiores do que os outros modelos candidatos; e III) a análise de variância (ANOVA) usando o teste de Chi-quadrado indicasse que o novo modelo fosse significativamente diferente do anterior, justificando a inclusão da nova variável.

Tabela 2.1. Descrição das variáveis espaço-temporais e ambientais utilizadas para analisar os padrões de ocorrência de tubarões cabeça-chata, incluindo o nome das variáveis explicativas (Variável), as abreviações utilizadas nos modelos (Abreviação), o tipo da variável (Tipo) e suas respectivas descrições (Descrição).

Variável	Abreviação	Tipo	Descrição
Ano	Ano	Contínua	2005 – 2014
Mês	Mês	Contínua	1 – 12
Aparelho de pesca	AparPes	Categórica	Espinhéis afastados da costa / Linhas de espera mais próximas da costa
Área de pesca	AreaPes	Categórica	Boa Viagem e Piedade (BV) / Paiva (PA)
Fase lunar	FaseLun	Categórica	Nova, crescente, cheia, minguante
Pluviosidade	Pluvio	Contínua	Chuva em milímetros
Temperatura da superfície	TSM	Contínua	Temperatura da superfície do mar, em graus Celsius
Insolação	Inso	Contínua	Número diário de horas de luz solar
Radiação solar acumulada	RadSolAc	Contínua	Radiação solar diária em milijoules por metro quadrado
Velocidade de vento	VelVent	Contínua	Velocidade em metros por segundo
Direção de vento	DirVent	Contínua	Direção do vento em 0–360 graus, sentido horário

Fonte: Dados da pesquisa

2.3. RESULTADOS

2.3.1. Esforço de pesca e composição das capturas

O esforço de pesca global totalizou 506.861 anzóis, os quais foram distribuídos em 3.470 lances de pesca com espinhéis e 6.907 com linhas de espera, realizados ao longo de 413 cruzeiros de pesca entre setembro de 2005 e dezembro de 2014. Um total de 18 tubarões cabeça-chata foram capturados desde o início das atividades do PROTUBA, em maio de 2004. Não foi encontrada diferença estatística em relação à proporção sexual de tubarões machos e fêmeas (proporção macho: fêmea = 0,63: 1; $\chi^2 = 0,888$, gl. = 1, $p = 0,345$), e 55% dos espécimes capturados mediam entre 180 e 240 cm C_T (Fig. 2.4). Também não houve diferença significativa entre os comprimentos totais de ambos os sexos ($D = 0,31$; $p = 0,907$).

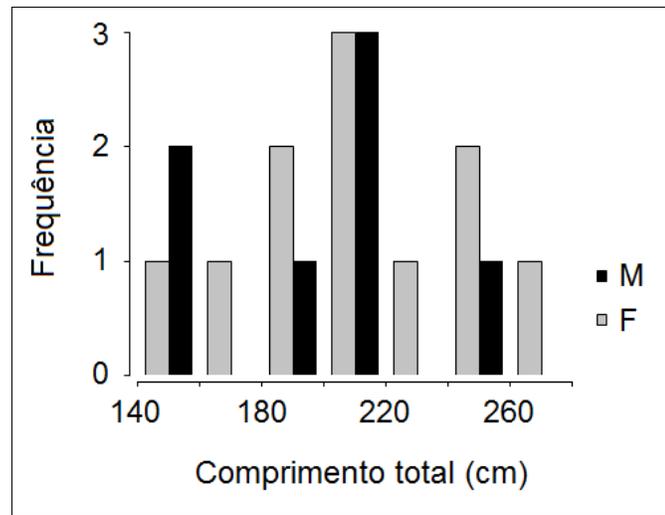
2.3.2. Biologia

As regressões entre as medidas de comprimento e de peso tiveram um bom ajuste aos dados, devido aos valores de R^2 terem sido maiores do que 0,9. Foi observado crescimento isométrico entre C_T e C_F , C_P e C_I para ambos os sexos combinados e para cada um dos sexos separados (Tabela 2.2). Ambas as regressões para o C_F (Fig. 2.5a) e o C_P (Fig. 2.5b) foram bastante similares, enquanto que o C_I apresentou uma menor inclinação (Fig. 2.5c), indicando um menor crescimento relativo, como esperado. Em relação ao peso, os modelos para ambos os sexos combinados e separados (Tabela 2.2) indicaram um menor aumento de peso dos tubarões cabeça chata até tamanhos em torno de 220 cm, em torno do qual os tubarões pesavam menos que 80 kg. Entretanto, houve um aumento repentino no peso dos tubarões cabeça-chata a partir deste tamanho, alcançando valores de aproximadamente 140 kg por volta de tamanhos em torno de 260 cm (Fig. 2.5d).

Tabela 2.2. Resultados das regressões lineares e exponenciais entre as medidas de comprimento (C_F , C_P e C_I) e peso (P_T), e o comprimento total (C_T) dos tubarões cabeça-chata capturados na RMR, para ambos os sexos combinados (Geral) e para cada um dos sexos separados.

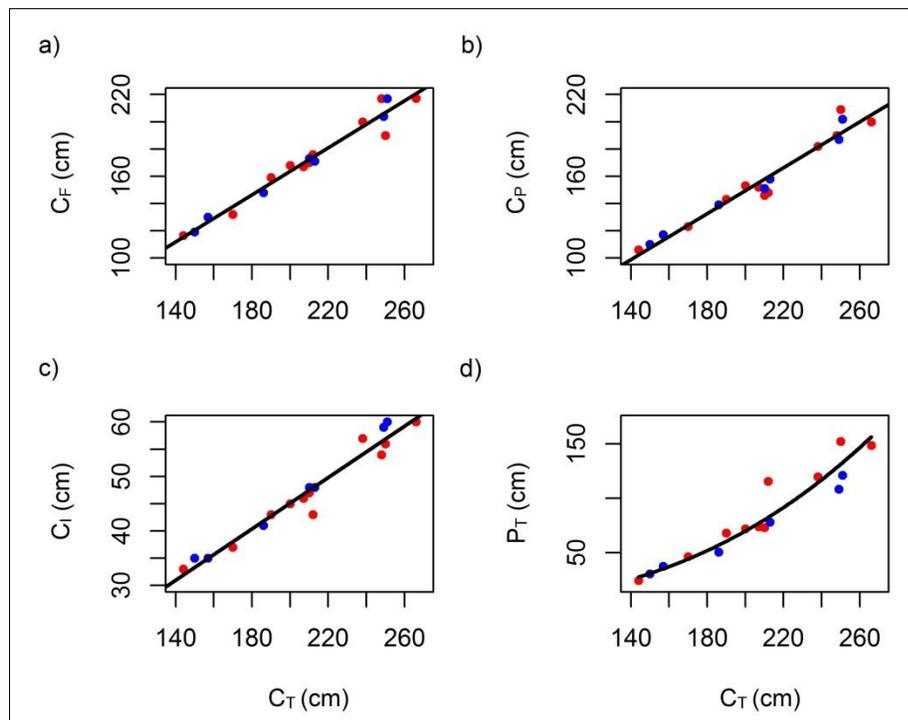
Medida	Regressão	Geral		Machos		Fêmeas	
		Fórmula	R ²	Fórmula	R ²	Fórmula	R ²
C_F	Linear	$C_F = -9,22 + 0,86 \cdot C_T$	0,961	$C_F = -14,95 + 0,89 \cdot C_T$	0,981	$C_F = -5,26 + 0,84 \cdot C_T$	0,941
C_P	Linear	$C_P = -19,04 + 0,84 \cdot C_T$	0,949	$C_P = -15,96 + 0,83 \cdot C_T$	0,969	$C_P = -22,08 + 0,85 \cdot C_T$	0,931
C_I	Linear	$C_I = -2,06 + 0,23 \cdot C_T$	0,952	$C_I = -4,74 + 0,25 \cdot C_T$	0,984	$C_I = -0,94 + 0,22 \cdot C_T$	0,942
P_T	Exponencial	$P_T = -10,72 \cdot C_T^{2,82}$	0,942	$P_T = -9,20 \cdot C_T^{2,52}$	0,989	$P_T = -11,69 \cdot C_T^{3,01}$	0,938

Fonte: Dados da pesquisa



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.4. Distribuição de frequência por classes de tamanho dos tubarões cabeça-chata machos (M), em preto, e fêmeas (F), em cinza, capturados na costa da RMR, entre 2004 e 2014.

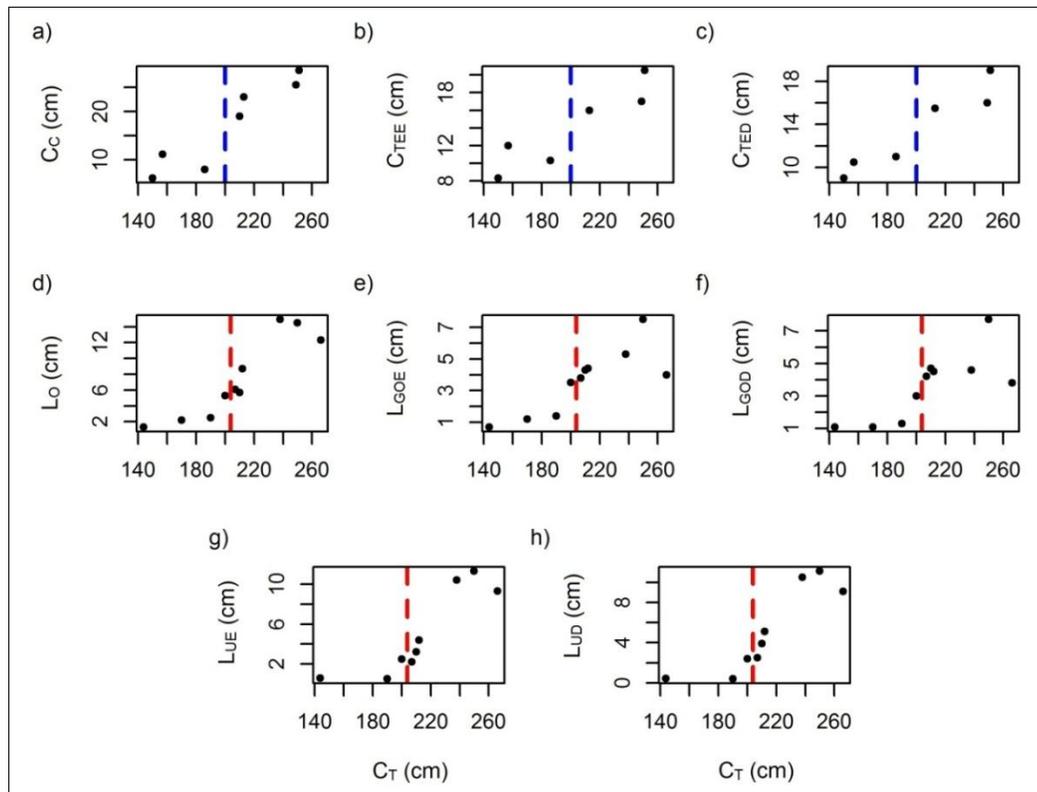


Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.5. Modelos de regressão linear entre os comprimentos total (C_T) e a) furcal (C_F), b) precaudal (C_P) e c) interdorsal (C_I), e d) regressão polinomial entre C_T e peso total (P_T). Os pontos azuis e vermelhos representam tubarões machos e fêmeas, respectivamente.

A maioria dos tubarões cabeça-chata capturados (61,1%) eram sexualmente adultos, não tendo sido detectada diferença estatística significativa na proporção sexual dos reprodutores (proporção macho:fêmea = 0,57: 1; $\chi^2 = 0,818$, gl. = 1, $p = 0,365$). A maioria desses tubarões adultos (81,8%) foi capturada durante o verão (entre setembro e fevereiro). Tubarões machos adultos corresponderam a 57,1% dos espécimes examinados, com tamanhos variando entre 213 e 251 cm, enquanto que o tamanho dos machos juvenis variou entre 157 e 186 cm (Tabela 2.3). Além disso, dois tubarões machos adultos medindo 213 e 249 cm apresentaram considerável volume de líquido seminal. Foi observada pouca variabilidade no C_C dos machos juvenis, sendo que os cláspes dobraram de tamanho em comparação aos cláspes de machos juvenis em tubarões > 220 cm (Fig.2.6a). O comprimento dos testículos variou entre 8 e 12 cm entre os machos juvenis, enquanto que os machos adultos apresentaram testículos > 18 cm de comprimento (Fig. 2.6b-c). A maioria das fêmeas de tubarão cabeça-chata (72,7%) era sexualmente adulta, com tamanhos variando entre 205 e 266 cm, enquanto que o tamanho das fêmeas juvenis variou entre 144 e 190 cm (Tabela 2.3). Os ovários aumentaram pouco em largura entre as fêmeas medindo de 140 a 220 cm, entretanto, dobraram de largura em comparação com as fêmeas juvenis nos tamanhos > 240 cm (Fig. 2.6d). As glândulas oviducais se mostraram pouco espessas (< 2 cm) e sem muita variação de largura entre as fêmeas juvenis. Entretanto, entre as fêmeas adultas atingiram larguras > 7 cm (Fig. 2.6e-f). O útero também apresentou pouca variação em espécimes juvenis, atingindo menos do que 3 cm de largura, enquanto que as fêmeas adultas apresentaram úteros com mais de 10 cm de largura (Fig. 2.6g-h). Nenhuma fêmea grávida foi capturada durante todo o período.

Entre os 16 estômagos dissecados a maioria (61,1%) estava vazio (IR = 0), sendo que um tubarão apresentou estômago invertido no momento da captura. Entre o restante dos estômagos, a maioria apresentou volume bastante reduzido (IR= 0), sendo que os dois estômagos mais cheios tiveram IR iguais a 0,25 e 0,75. Os itens alimentares identificados nos estômagos de três tubarões juvenis (< 190 cm) compreenderam duas colunas vertebrais de teleósteos e um bico de lula. Os estômagos de três indivíduos adultos medindo 238, 248 e 266 cm, apresentaram restos de uma espécie não identificada de raia, fragmentos de uma espécie não identificada de caranguejo, e a cabeça de um bagre da espécie *Sciades proops*, respectivamente.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.6. Relações entre os comprimentos total (C_T) e a) do clássper (C_C), b) do testículo esquerdo (C_{TEE}), c) do testículo direito (C_{TED}), d) larguras do ovário (L_O), e) da glândula oviducal esquerda (L_{GOE}), f) da glândula oviducal direita (L_{GOD}), g) do útero esquerdo (L_{UE}) e h) do útero direito (L_{UD}). As linhas pontilhadas azuis em a), b) e c) representam o tamanho de maturação dos machos; e vermelhas em d), e), f), g) e h) representam o tamanho de maturação das fêmeas.

Tabela 2.3. Aspectos reprodutivos dos tubarões cabeça-chata capturados na costa da RMR, incluindo o sexo, número total de espécimes capturados (N), estágio de maturação (Est. Mat.), as variações de comprimento total (C_T), peso total (P_T), comprimento do clássper (C_C), comprimento dos testículos (C_{TE}), largura do ovário (L_O), largura da glândula oviducal (L_{GO}) e largura do útero (L_U).

Sexo	N	Est. Mat.	C_T (cm)	P_T (kg)	C_C (cm)	C_{TE} (cm)	L_O (cm)	L_{GO} (cm)	L_U (cm)
Macho	3	Juvenil	157-186	30,6-50,5	6,2-11,2	8,3-12			
Macho	4	Maduro	213-251	74,2-121	23-28,5	16-20,5			
Fêmea	3	Juvenil	144-190	24,2-68			1,3-2,5	0,6-1,4	0,3-0,5
Fêmea	8	Maduro	205-266	72-148,5			5,3-14,9	3-7,7	2,2-11,3

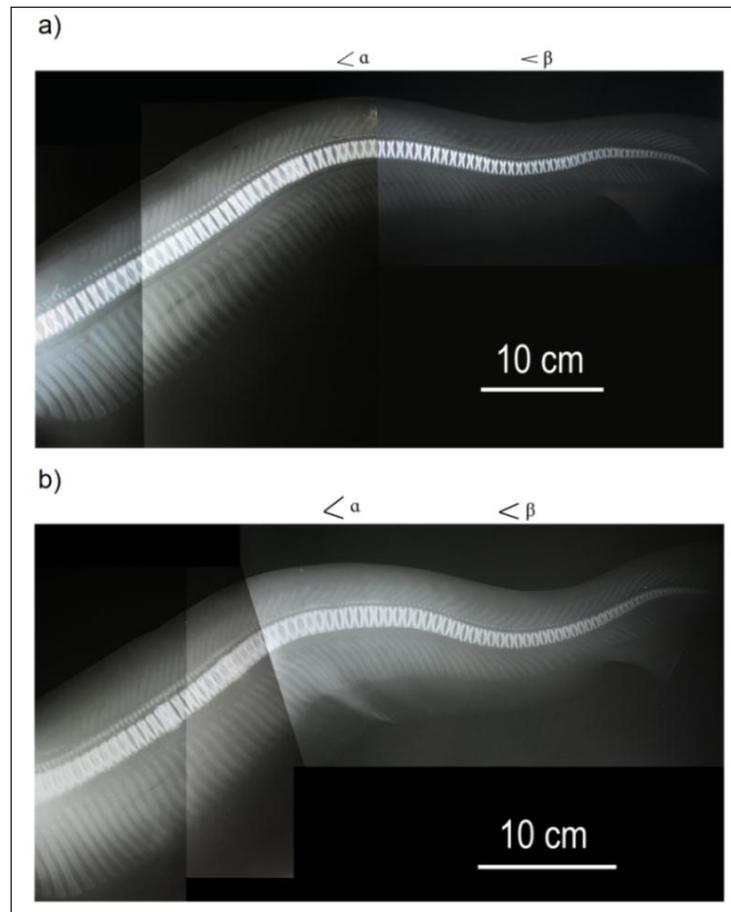
Fonte: Dados da pesquisa

2.3.3. Análises das alterações morfológicas

As radiografias das nadadeiras caudais dos tubarões cabeça-chata revelaram alterações no alinhamento natural da coluna vertebral (lordose), em torno da 67^a vértebra no T1 com um ângulo de -46° (Fig. 2.7a), e na 71^a vértebra no T2 com um ângulo de -56° (Fig. 2.7b). Essas deformações foram seguidas por desvios dorsais (cifose), aproximadamente na 43^a (T1) e 44^a (T2) vértebras, com ângulos medindo respectivamente $+24^\circ$ (Fig. 2.7a) e $+43^\circ$ (Fig. 2.7b). O raio X da primeira nadadeira dorsal do T2 não mostrou a presença de deformações esqueléticas na ceratotrichia (Fig. 2.8), indicando que a alteração morfológica ocorreu apenas sobre o tecido adjacente, formado em sua porção interna pela camada de feixes fibrosos oriundos do restante do corpo do tubarão e pela camada externa de dentículos dérmicos (SOLIAR, 2005).

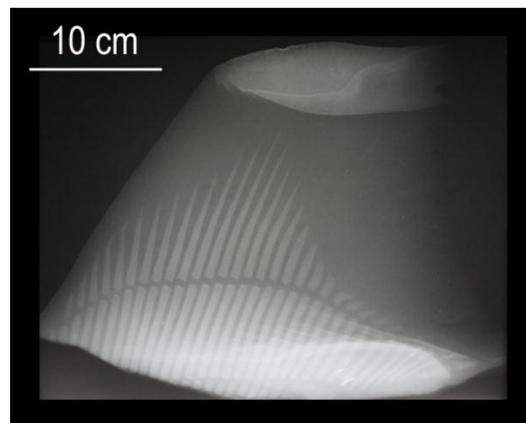
Ao examinar detalhadamente os raios X das nadadeiras não foi possível distinguir claramente os espaços entre os discos intervertebrais em alguns segmentos da coluna, principalmente entre os segmentos 58-63, 67-72 e 82-89 em T1, com evidência de fusão vertebral particularmente no segmento 67-72. Tais anomalias foram ainda mais pronunciadas em T2, apresentando uma espondilose evidente e a perda da configuração normal da coluna nos segmentos 71-78, 83-84 e da 88^a vértebra em diante. O par 83-84 possuía uma forte indicação de fusão vertebral, a qual veio a ser confirmada após a dissecação (Fig. 2.9). Considerando que os tubarões cabeça-chata possuem um total de 208-218 vértebras, numeradas a partir do crânio (Springer e Garrick, 1964), a localização dessas malformações estaria compreendida entre as vértebras 119-129 a 165-175.

Em relação à análise de poluentes orgânicos na musculatura desses tubarões, o somatório das concentrações de bifenilas policloradas (Σ PCB) por peso seco totalizaram os valores de $14,55 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ em T1 e $13,69 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ em T2 (Tabela 2.4), sendo maiores do que o somatório das concentrações de pesticidas orgânicos (Σ OCP) para ambos os tubarões ($T1 = 3,63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; $T2 = 2,16 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), provavelmente devido ao menor número de congêneres de OCP detectados (Tabela 2.5). O único OCP encontrado em ambos os tubarões foi o diclorodifenildicloroetileno (p,p'-DDE) (Tabela 2.5).



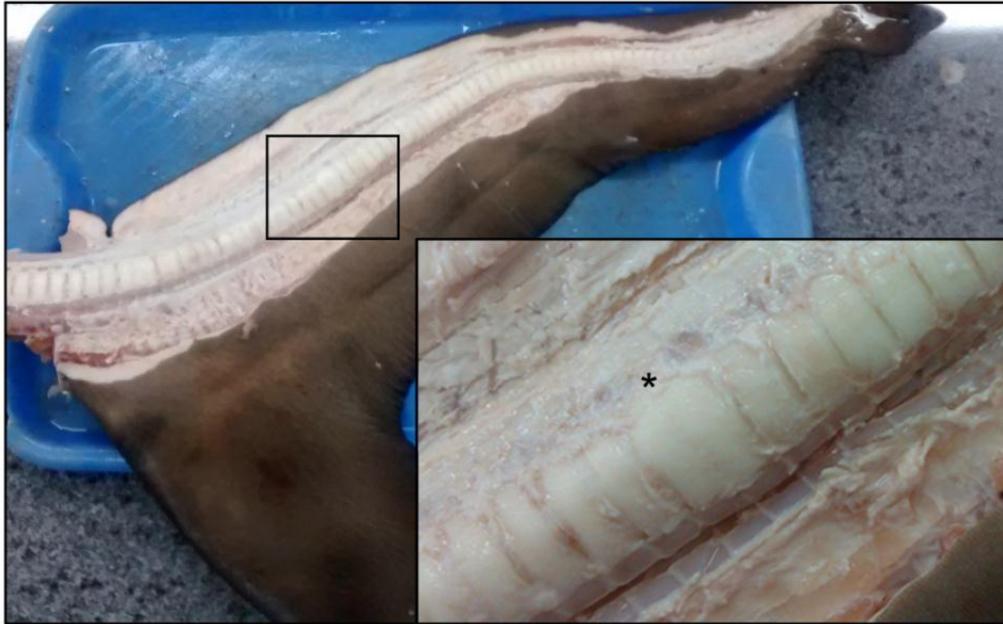
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.7. Raios X das nadadeiras caudais dos tubarões T1 (a) e T2 (b). As posições dos respectivos ângulos das curvaturas lordóticas (α) e cifóticas (β) também estão representadas, sendo em a) $\alpha = 46^\circ$ e $\beta = 24^\circ$, e em b) $\alpha = 56^\circ$ e $\beta = 43^\circ$.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.8. Raio X da primeira nadadeira dorsal do T2 mostrando a ceratotrichia sem nenhuma deformação aparente.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.9. Nadadeira caudal dissecada do T2 com o detalhe (*) para a fusão entre os discos vertebrais 83 e 84.

Tabela 2.4. Concentração média ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) dos congêneres de bifenilas policloradas (PCB) no músculo dos tubarões cabeça-chata T1 e T2, capturados na RMR.

PCB	T1	T2
47/75	< 1,64	< 1,62
51	n.d.	< 1,62
138/160	5,12	4,82
153	3,07	2,81
172/192	< 1,64	n.d.
175	n.d.	< 1,62
180	< 1,64	< 1,62
182/187	3,20	3,01
183	3,16	3,05
ΣPCBs	14,55	13,69

Fonte: Dados da pesquisa; n.d. = não detectado

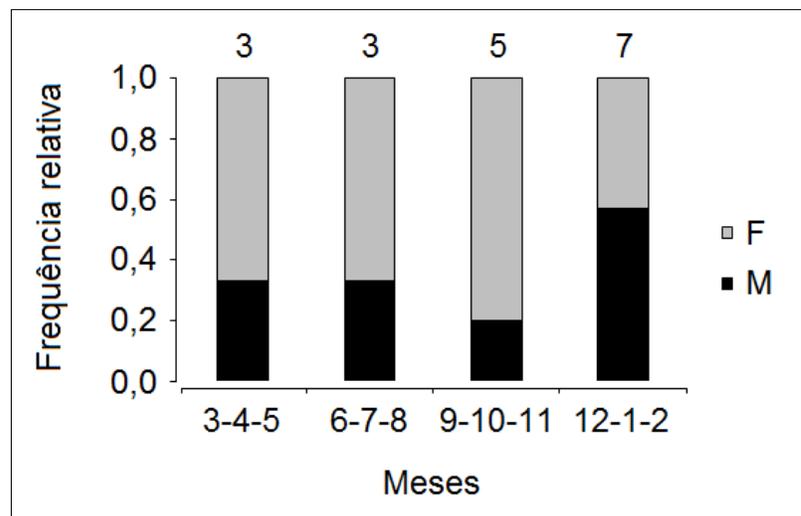
Tabela 2.5. Concentração média ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$) dos pesticidas orgânicos (OCP) encontrados no músculo dos tubarões cabeça-chata T1 e T2, capturados na RMR.

OCP	T1	T2
o,p'-DDT	n.d.	n.d.
p,p'-DDT	n.d.	n.d.
o,p'-DDD	n.d.	n.d.
p,p'-DDD	n.d.	n.d.
o,p'-DDE	n.d.	n.d.
p,p'-DDE	3,63	2,16
ΣOCP	3,63	2,16

Fonte: Dados da pesquisa; n.d. = não detectado

2.3.4. Padrões de ocorrência

Não foi encontrada significância estatística em relação à proporção de tubarões cabeça-chata machos e fêmeas capturados ao longo dos trimestres (Fig. 2.10) ($p = 0,722$), sugerindo que ambos os sexos foram igualmente abundantes ao longo do ano.



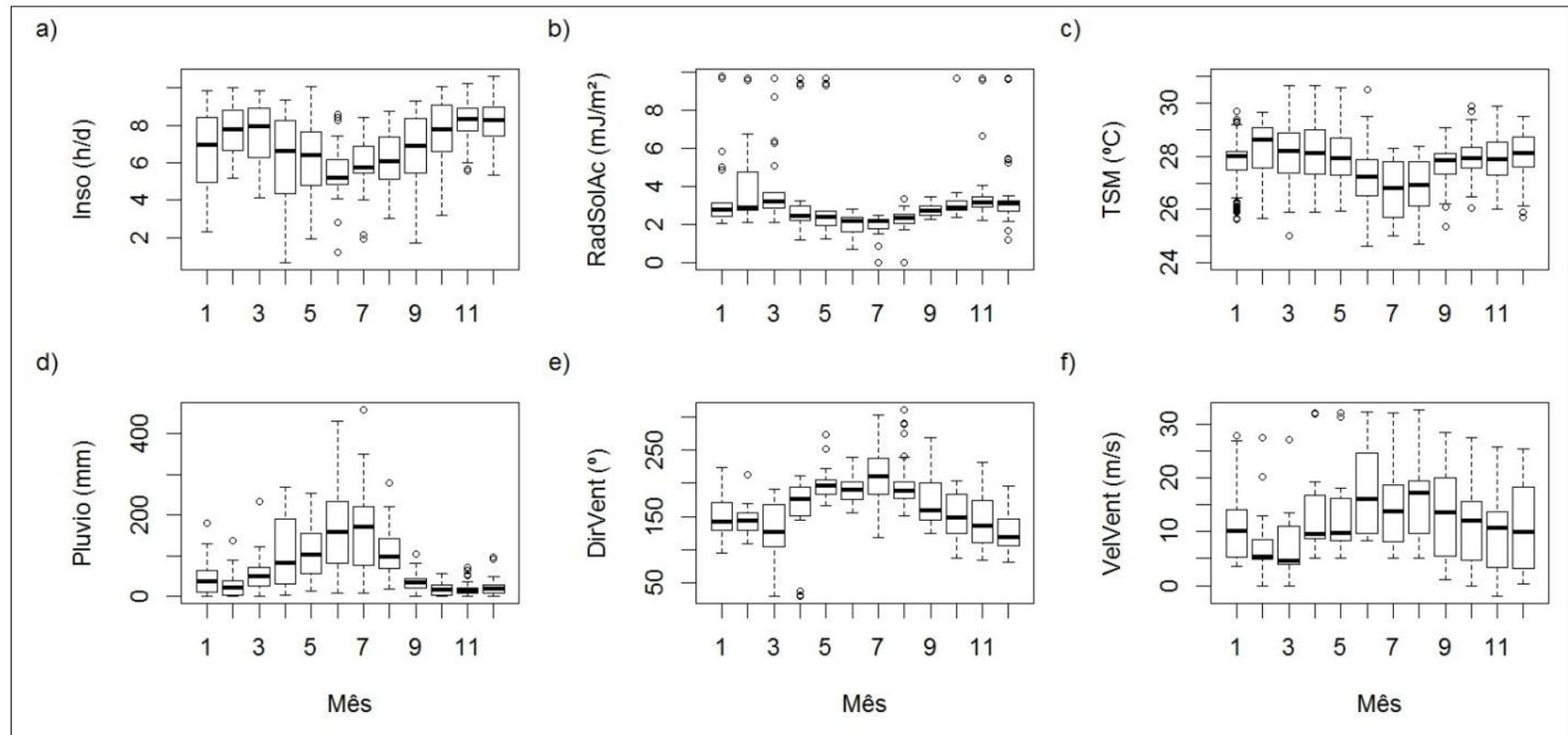
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.10. Variação trimestral da proporção de tubarões cabeça-chata machos (M) em preto e fêmeas (F) em cinza. Os números acima das barras representam o número total de tubarões capturados em cada um dos trimestres.

Todas as variáveis ambientais apresentaram sazonalidade bem definida, tal como esperado. Os valores de insolação diária foram maiores entre outubro e março, atingindo valores máximos ($> 10 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$) no mês de dezembro (Fig. 2.11a). Os valores diários de radiação solar acumulada tiveram pouca variação sazonal, variando em sua maior parte entre 2 e $4 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, entretanto, valores um pouco menores de radiação solar foram registrados entre abril e agosto, com os valores mínimos ($< 2 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$) ocorrendo durante os meses de junho e julho (Fig. 2.11b). Em relação à temperatura da superfície do mar, a água esteve mais quente entre setembro e fevereiro ($> 28^\circ\text{C}$), enquanto que as menores temperaturas médias ($< 27^\circ\text{C}$) foram registradas entre junho e agosto (Fig. 2.11c). Os níveis pluviométricos foram maiores ($> 100 \text{ mm}$) entre abril e agosto, com um pico nos meses de junho e julho, e os menores valores de precipitação tendo sido registrados entre outubro e dezembro (Fig. 2.11d). Ventos predominantemente de leste e nordeste foram observados entre novembro e fevereiro, enquanto que os ventos de sudeste foram mais frequentes entre abril e setembro (Fig. 2.11e). A velocidade dos ventos foi maior entre junho e agosto ($> 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), com ventos menos intensos ($\sim 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) em fevereiro e março (Fig. 2.11f).

As comparações entre os modelos GAM e ZIGAM para cada uma das variáveis explicativas revelaram que os ZIGAM sempre exibiram maiores valores de $\log E$ e $w_i(\text{AIC})$ (Tabela 2.6), indicando que o conjunto de dados deveria ser considerado como inflado de zeros. Consequentemente, o modelo ZIGAM foi utilizado para realizar as análises subsequentes. Uma vez que foi detectada multicolinearidade entre TSM e insolação, TSM e radiação solar acumulada, direção de vento e pluviosidade, e direção de vento e velocidade de vento (Tabela 2.7), essas variáveis não foram incluídas simultaneamente no mesmo modelo.

O procedimento completo de seleção das variáveis espaço-temporais está detalhado nas tabelas 2.8.1 e 2.8.2. O modelo espaço-temporal final incluiu as variáveis ano, mês, aparelho de pesca e área de pesca (Tabela 2.8.3). Houve uma redução na ocorrência de tubarões cabeça-chata entre os anos de 2008 e 2011 (Fig. 2.12a), sendo que nenhum indivíduo foi capturado em 2009 e 2010 ($\text{Esforço}_{2009} = 51.906 \text{ anzóis}$; $\text{Esforço}_{2010} = 97.908 \text{ anzóis}$).



Fonte: Dados da pesquisa; adaptado do CPTEC (2014) e BDMEP (2014)

Figura 2.11. Distribuição sazonal das variáveis ambientais a) insolação (Inso), b) radiação solar acumulada (RadSolAc), c) temperatura da superfície do mar (TSM), d) pluviosidade (Pluvio), e) direção de vento (DirVent) e f) velocidade de vento (VelVent), utilizadas para modelar a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR.

Tabela 2.6. Comparação entre as abordagens utilizando GAM e ZIGAM para modelar a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa de Recife. As variáveis explicativas (Variáveis) e os seus respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$ e $w_i(\text{AIC})$ estão representados.

Variáveis	logE		AIC		$\Delta(\text{AIC})$		$w_i(\text{AIC})$	
	GAM	ZIGAM	GAM	ZIGAM	GAM	ZIGAM	GAM	ZIGAM
Ano	-72,48	-57,02	246,1	113,9	132,2	0	0,0360	0,9639
Mês	-74,12	-59,34	251,3	118,6	132,7	0	0,0704	0,9295
FaseLun	-79,22	-57,47	247,6	114,8	132,8	0	0,0450	0,9549
TSM	-79,09	-57,73	248,5	115,4	133,1	0	0,0477	0,9522
Inso	-80,21	-58,60	250,7	117,1	133,6	0	0,0247	0,9752
RadSolAc	-81,27	-59,46	251,2	118,8	132,4	0	0,0222	0,9777
Pluvio	-78,76	-56,54	245,1	112,9	132,2	0	0,0360	0,9639
DirVent	-81,54	-59,21	251,9	118,3	133,6	0	0,0247	0,9752
VelVent	-80,92	-58,13	249,3	116,2	133,1	0	0,0747	0,9252

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 2.7. Sumário das análises de correlação entre as possíveis variáveis explicativas ambientais. São apresentados os respectivos resultados da estatística t (t), os graus de liberdade (gl.), o valor de p (p), os limites inferiores (LI) e superiores (LS) de 95% dos intervalos de confiança para os resultados dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e Spearman (s).

Variável 1	Variável 2	t	gl.	p	LI	LS	r	s
TSM*	Inso*	4,107	20	<0,001	0,356	0,854	0,67	0,78
TSM*	RadSolAc*	2,137	20	0,045	0,011	0,721	0,43	0,67
TSM	Pluvio	-6,948	20	<0,001	-0,932	-0,649	-0,84	-0,82
TSM	DirVent	-5,010	20	<0,001	-0,888	-0,473	-0,74	-0,71
TSM	VelVent	-0,342	20	0,735	-0,482	0,356	-0,07	-0,06
Inso	RadSolAc	1,399	20	0,177	-0,140	0,639	0,29	0,45
Inso	Pluvio	-4,621	20	<0,001	-0,875	-0,426	-0,71	-0,79
Inso	DirVent	-4,118	20	<0,001	-0,854	-0,358	-0,67	-0,67
Inso	VelVent	-0,985	20	0,336	-0,583	0,226	-0,21	-0,21
RadSolAc	Pluvio	-1,715	20	0,101	-0,677	0,074	-0,35	-0,61
RadSolAc	DirVent	-0,877	20	0,390	-0,568	0,249	-0,19	-0,40
RadSolAc	VelVent	-0,549	20	0,588	-0,517	0,315	-0,12	0,19
Pluvio*	DirVent*	4,114	20	<0,001	0,357	0,854	0,67	0,55
Pluvio	VelVent	-0,881	20	0,388	-0,568	-0,248	-0,19	-0,04
DirVent*	VelVent*	4,953	20	<0,001	0,466	0,886	0,74	0,75

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Variáveis que apresentaram correlação significativa

Em relação à sazonalidade, houve uma maior ocorrência de tubarões cabeça-chata durante o verão, entre os meses de novembro e fevereiro, com uma menor chance de ocorrência de tubarões durante o início do inverno, entre março e maio (Fig. 2.12b). Um valor médio de CPUE 4,5 vezes maior de tubarões cabeça-chata foi observado nas linhas de espera ($0,178 \pm 2,616$ tubarões/1.000 anzóis) em comparação com os espinhéis ($0,039 \pm 0,302$ tubarões/1.000 anzóis), os quais operaram a uma maior distância da costa. Em concordância, o modelo também detectou uma maior probabilidade de tubarões cabeça-chata serem capturados com linhas de espera do que com espinhéis (Tabela 2.8.3). Além disso, verificou-se uma maior probabilidade de ocorrência de tubarões cabeça-chata em BV do que no PA (Tabela 2.8.3).

O processo de seleção das variáveis ambientais está detalhado nas tabelas 2.9.1 e 2.9.2. O modelo ambiental incluiu as variáveis velocidade de vento, TSM, pluviosidade e fase lunar (Tabela 2.9.3). Os tubarões cabeça-chata mostraram uma tendência de serem mais frequentes na região com velocidades de vento menores do que $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e maiores do que $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, com um efeito negativo entre 5 e $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 2.13a). Valores de TSM entre 24 e 26°C influenciaram negativamente a presença de tubarões cabeça-chata na região, enquanto que temperaturas acima de 26°C favoreceram uma maior ocorrência de tubarões (Fig. 2.13b). Baixos índices de pluviosidade, com valores máximos por volta de 200 mm, tiveram um efeito positivo na ocorrência de *C. leucas*, entretanto, índices de precipitação acima de 200 mm influenciaram negativamente a ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da Região Metropolitana do Recife (Fig. 2.13c). O ciclo lunar também apresentou efeito significativo, com uma maior probabilidade de ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR durante períodos de lua cheia do que em períodos de lua minguante (Tabela 2.9.3).

Tabela 2.8.1. Processo de seleção das variáveis para o ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representadas a porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$.

Modelo	Dev.exp	logE	AIC	$\Delta_i(\text{AIC})$	$w_i(\text{AIC})$
Null	0,00%	-41,01	514,90	64,13	< 0,0001
Ano	6,67%	-23,46	468,84	18,07	< 0,0001
Mês	2,64%	-24,46	489,07	38,30	< 0,0001
AparPes	2,22%	-38,20	512,31	61,54	< 0,0001
AreaPes	2,19%	-38,21	512,57	61,80	< 0,0001
Ano + Mês	9,25%	-22,82	455,95	5,18	0,0553
Ano + AparPes	7,03%	-23,37	467,07	16,30	0,0002
Ano + AreaPes	6,78%	-23,43	468,30	17,53	0,0001
Ano + Mês + AparPes	9,61%	-22,73	454,18	3,41	0,1340
Ano + Mês + AreaPes	9,36%	-22,80	455,41	4,64	0,0724
Ano + Mês + AparPes + AreaPes*	11,10%	-22,57	450,77	0,00	0,7376

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Modelo final

Tabela 2.8.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis ao ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explica (var.) e o valor de p (p).

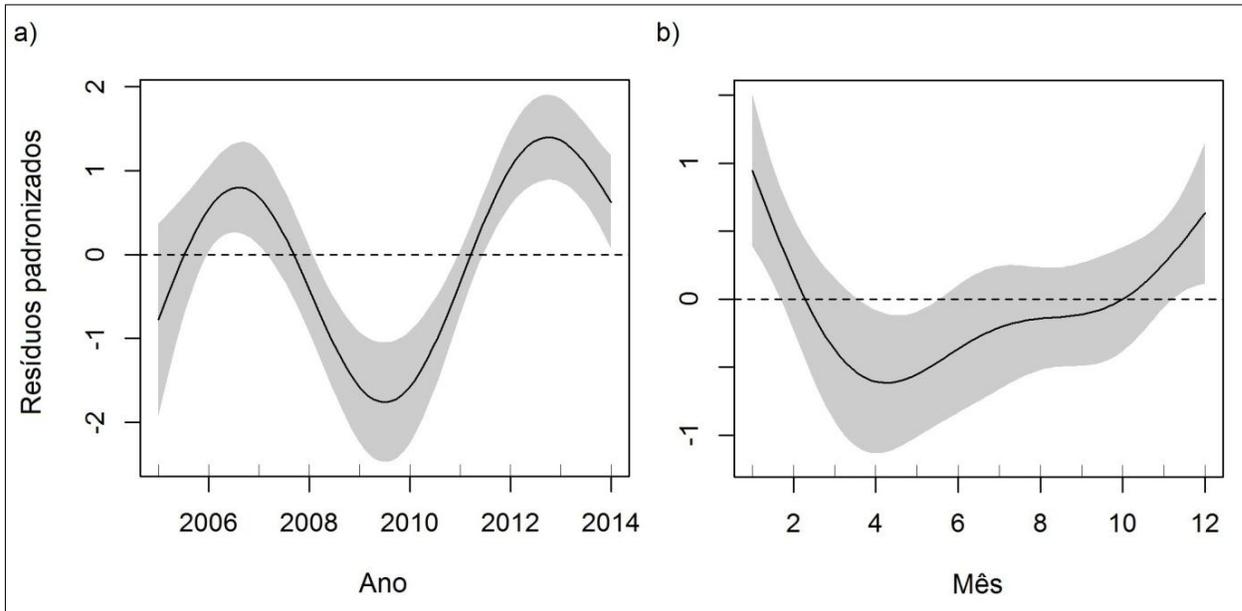
Modelo 1	Modelo 2	gl.res.	var.res.	gl.	var.	p
Nulo		1595	57227			
Nulo	Ano	1287	46873	307	10354,1	< 0,001
Ano	Ano + Mês	1282	45293	4	1579,9	< 0,001
Ano + Mês	Ano + Mês + AparPes	1281	45115	1	117,9	< 0,001
Ano + Mês + AparPes	Ano + Mês + AparPes + AreaPes	1280	45054	1	61,2	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 2.8.3. ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para as variáveis contínuas e dos valores de p (p) correspondentes.

Modelo	Variável	Coef.est.	Err.pad	z	gl.efe.	gl.ref.	Chi.qua	p
Ano + Mês + AparPes + AreaPes	Intercepto	-5,81	0,116	-49,71				< 0,001
	Ano*				3,94	3,99	30,79	< 0,001
	Mês*				4,28	4,76	22,08	< 0,001
	(AparPes)espinhel	-0,25	0,114	10,94				< 0,001
	(AreaPes)PA	-0,22	0,029	-7,80				< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Variáveis modeladas com funções suavizadoras contínuas



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.12. ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR, representando os efeitos das variáveis a) ano e b) mês. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente.

Tabela 2.9.1. Processo de seleção das variáveis para o ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representadas a porcentagem de deviência explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$.

Modelo	Dev.exp	logE	AIC	$\Delta_i(\text{AIC})$	$w_i(\text{AIC})$
Nulo	0,00%	-61,22	122,90	12,81	0,0006
FaseLun	2,00%	-69,12	118,05	7,96	0,0071
Pluvio	1,25%	-60,58	121,15	11,06	0,0015
TSM	1,97%	-60,15	120,27	10,18	0,0023
Inso	1,33%	-60,55	121,07	10,98	0,0015
RadSolAc	2,80%	-59,65	119,26	9,17	0,0039
DirVent	1,22%	-60,61	121,19	11,10	0,0014
VelVent	4,16%	-58,81	117,59	7,50	0,0089
VelVent + Pluvio	5,93%	-57,74	115,43	5,34	0,0264
VelVent + TSM	6,44%	-57,43	114,80	4,71	0,0363
VelVent + Inso	4,93%	-58,35	116,66	6,57	0,0143
VelVent + RadSolAc	4,70%	-58,49	116,93	6,84	0,0125
VelVent + FaseLun	6,87%	-57,16	114,27	4,18	0,0473
VelVent + FaseLun + Pluvio	8,12%	-56,40	112,75	2,66	0,1011
VelVent + FaseLun + TSM	9,34%	-55,66	111,25	1,16	0,2142
VelVent + FaseLun + Inso	7,64%	-56,70	113,34	3,25	0,0753
VelVent + FaseLun + RadSolAc	7,32%	-56,90	113,73	3,64	0,0619
VelVent + FaseLun + TSM + Pluvio*	10,30%	-55,08	110,09	0,00	0,3826

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Modelo final

Tabela 2.9.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis ao ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).

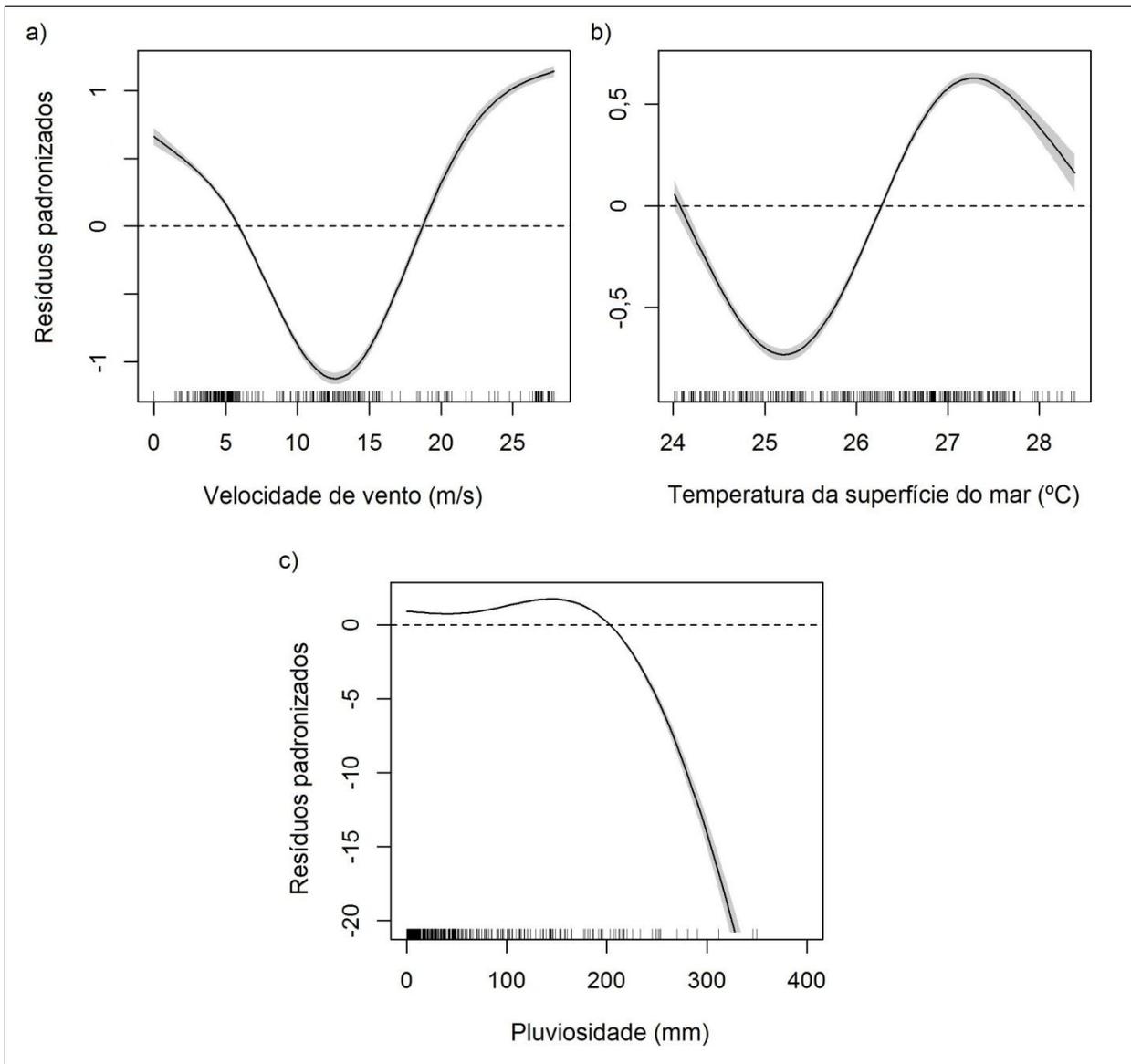
Modelo 1	Modelo 2	gl.res.	var.res.	gl.	var.	p
Nulo		417,86	132272			
Nulo	VelVent	322,02	117587	95,840	14685,0	< 0,001
VelVent	VelVent + FaseLun	319,02	114255	3,002	3331,8	< 0,001
VelVent + FaseLun	VelVent + FaseLun + TSM	316,02	111234	2,994	3021,2	< 0,001
VelVent + FaseLun + TSM	VelVent + FaseLun + TSM + Pluvio	314,03	110066	1,995	1167,8	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 2.9.3. ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para variáveis contínuas, além dos valores de p (p) correspondentes.

Modelo	Variável	Coef.est.	Err.pad.	z	gl.efe.	gl.ref.	Chi.qua	p	
VelVent + FaseLun + TSM + Pluvio	Intercepto	-2,74	0,016	-164,10				< 0,001	
	VelVent*				4,99	5,00	4304,9	< 0,001	
	(FaseLun)minguante	-2,05	0,586	-3,50				< 0,001	
	(LunPha)nova	-0,80	0,319	-2,50				0,012	
	(LunPha)crescente	-0,11	0,266	-0,43				0,665	
	TSM*					2,99	3,00	2439,8	< 0,001
	Pluvio*					1,99	2,00	801,1	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Variáveis modeladas com funções suavizadoras contínuas



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 2.13. ZIGAM ambiental da ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR, representando os efeitos das variáveis a) velocidade de vento, b) temperatura da superfície do mar e c) pluviosidade. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente.

2.4. DISCUSSÃO

Os tubarões cabeça-chata são importantes predadores de topo, capazes de acessar ambientes de água doce indisponíveis para a maioria das outras espécies de carcharhinídeos (PILLANS et al., 2005; REILY et al., 2011). A dependência desses tubarões da utilização de habitats costeiros, estuarinos e de água doce em diferentes fases ontogenéticas ao longo do seu ciclo de vida (HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; YEISER et al., 2008; STREICH & PETERSON, 2011; WERRY et al., 2011) torna esta espécie altamente vulnerável à pressão antrópica sobre a zona costeira (MARTIN, 2005). Além disso, existe uma forte evidência de que os tubarões cabeça-chata sejam intensamente explorados pela atividade pesqueira no Oceano Atlântico Sul Ocidental (KARL et al., 2011). A lista vermelha das espécies ameaçadas da International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN), atualmente considera os *C. leucas* como uma espécie quase ameaçada (SIMPFENDORFER & BURGESS, 2009). Portanto, é necessário um maior conhecimento científico a respeito da bioecologia dessa espécie nesta parte do Atlântico para subsidiar a implementação de estratégias de conservação.

Apesar do elevado esforço amostral e do longo período (132 meses) abordado pelo presente estudo, apenas um pequeno número de tubarões cabeça-chata foram capturados (18 tubarões/~500.000 anzóis), indicando que *C. leucas* é uma espécie de tubarão pouco frequente na costa da RMR. Em comparação, uma maior quantidade de tubarões cabeça-chata foi capturada na costa da Flórida durante apenas 79 dias (27 tubarões/~11.000 anzóis), utilizando aparelhos de pesca semelhantes (HEITHAUS et al., 2007). Outras espécies de médio e grande porte, capturadas na mesma região em quantidades consideravelmente superiores, incluem os tubarões flamengo (*Carchahinus acronotus*), lixa (*Ginglymostoma cirratum*) e tigre (AFONSO; ANDRADE; HAZIN; 2014).

O menor tubarão cabeça-chata capturado pelo PROTUBA correspondeu a uma fêmea juvenil medindo 144 cm C_T , cuja idade foi estimada em torno de quatro anos (CRUZ-MARTÍNEZ et al., 2004). Nenhum tubarão neonato foi capturado na costa da RMR, provavelmente devido ao fato desses indivíduos tenderem a permanecer em habitats de água doce e estuarinos, como uma estratégia para reduzir a pressão exercida pela predação (PILLANS et al., 2005; HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; YEISER et al., 2008). Apesar dos tubarões tigre atingirem tamanhos superiores (> 5 m) ao dos tubarões cabeça-chata (HOLMES et al., 2012), o tamanho médio dos tubarões cabeça-chata capturados pelo PROTUBA foi superior ao dos

tubarões tigre (AFONSO; ANDRADE; HAZIN; 2008). Os tubarões cabeça-chata costumam dar à luz os seus filhotes entre o final da primavera e início do verão, e.g. entre maio e julho no hemisfério norte (SNELSON et al., 1984), e entre novembro e fevereiro no hemisfério sul (SADOWSKY, 1971). As fêmeas maduras de *C. leucas* mediram > 204 cm C_T , em concordância com o tamanho de maturação proposto por Cruz-Martínez et al. (2004). Apesar de tubarões cabeça-chata adultos terem correspondido à maior parte das capturas, nenhuma fêmea grávida foi capturada desde o início das atividades do projeto e nenhum sinal de atividade de cópula recente foi observado, e.g. tubarões fêmea apresentando ferimentos nas nadadeiras peitorais ou nos flancos além de abrasões ou lesões na região do orifício urogenital (PRATT & CARRIER, 2001), ou tubarões machos apresentando hemorragias subcutâneas ou externas nos cláspes (CLARK & VON SCHMIDT, 1965). Consequentemente, apesar de uma grande área estuarina com predominância de águas turvas se encontrar disponível ao longo do ano, não houve evidências que pudessem indicar que os tubarões cabeça-chata estejam atualmente utilizando essa região como área de berçário ou de acasalamento. A baixa qualidade da água, devido ao impacto causado pela poluição orgânica na região (SOUZA & TUNDISI, 2003; GUNKEL et al., 2007; NORIEGA & ARAUJO, 2009; NORIEGA & ARAUJO, 2011) poderá estar eventualmente impedindo a utilização dos estuários locais por *C. leucas* como áreas de berçário.

A explicação para as deformações encontradas nas nadadeiras caudais de duas fêmeas adultas de *C. leucas* deve estar provavelmente associada à pressão antrópica sobre os habitats dessa espécie, devido à sua utilização preferencial de áreas costeiras (HEUTER et al., 2005; REILY et al., 2011), as quais estão tipicamente mais expostas aos impactos causados pela atividade humana. A poluição química da água, incluindo a presença de diversos compostos tóxicos como metais pesados ou DDT, foram anteriormente associados a deformações na coluna vertebral de teleósteos (BENGTSON 1979; SLOOF 1982). Entretanto, concentrações médias elevadas de OCP ($1.802,9$ ng·g⁻¹) e PCB ($860,0$ ng·g⁻¹) foram detectadas em tubarões cacharhinídeos e laminídeos na costa da África do Sul, aparentemente sem sinais de deformações morfológicas (BEAUDRY et al., 2015). Os elasmobrânquios conseguem eliminar esse tipo de compostos orgânicos de uma maneira mais eficiente do que os teleósteos, devido ao maior tamanho do seu fígado (BALLANTYNE, 1997). O único poluente orgânico encontrado em ambos os tubarões foi o diclorodifenildicloroetileno (DDE), provavelmente devido à biotransformação do DDT, responsável por formar DDE através de um processo oxidativo (LEE

et al., 1997; STRANDBERG et al., 1998). O DDE é um metabólico altamente persistente, e com considerável potencial para bioacumulação (WHO, 1979; ATSDR, 2002), o qual tem sido descrito como o OCP encontrado com maior frequência em outras espécies de tubarões também capturados no Brasil (AZEVEDO-SILVA et al., 2009). As concentrações de PCB e OCP encontradas no presente estudo foram consideradas baixas e semelhantes aos valores encontrados em outras espécies de tubarões na costa brasileira, e.g. *Prionace glauca*, *Sphyrna zygaena*, *Isurus oxyrinchus* e *Alopias superciliosus* (AZEVEDO-SILVA et al., 2007; AZEVEDO-SILVA, 2009). Podemos concluir, então, que as deformações apresentadas pelos tubarões cabeça-chata capturados na costa da RMR não estão associadas à presença de contaminação por PCB e OCP, apesar de outras formas de poluição, não investigadas por esse estudo, poderem ter sido as responsáveis. Por exemplo, Al-Hassan et al. (2000) reportaram a presença de poluentes derivados de hidrocarbonetos do petróleo em tubarões do Golfo Árabe, na mesma região onde Moore (2015) observou que 7,7% dos tubarões galha-preta (*C. limbatus*) capturados apresentavam curvaturas nos lobos superiores das nadadeiras caudais, bastante similares às descritas neste estudo. Além disso, foi observada a transferência de radionuclídeos de origem antropogênica das mães para os embriões de tubarões (JEFFREE et al., 2015), facilitando assim a continuidade dos possíveis efeitos desses contaminantes. Outras possíveis causas de anomalias observadas em peixes incluem o desequilíbrio nutricional como a deficiência de vitamina C (SANDNESS, 1991), e o estresse causado por variações na temperatura da água (JOHANSON et al., 2015). Dadas as atuais perspectivas envolvendo o desenvolvimento antropogênico e as mudanças climáticas, pesquisas futuras são necessárias para esclarecer as verdadeiras fontes de tais anomalias morfológicas, bem como a sua incidência sobre as populações de tubarões, visando a compreender suas respectivas implicações para a conservação dessas espécies.

Mudanças ontogenéticas na dieta visando presas de maiores tamanhos geralmente ocorrem em tubarões cabeça-chata > 140 cm C_T (HEITHAUS, 2001), com mamíferos marinhos passando a se tornar parte da alimentação de indivíduos > 180 cm C_T (CLIFF & DUDLEY, 1991). Neste estudo, a dieta de indivíduos juvenis de *C. leucas* incluiu teleósteos e moluscos, enquanto que os adultos predaram sobre teleósteos, crustáceos e elasmobrânquios, em concordância com os resultados apresentados por outros indivíduos dessa espécie no Oceano Atlântico Sul (SADOWSKY, 1971; NOVELI & MESQUITA, 1990; AMORIM et al., 1998). A força da mandíbula em tubarões cabeça-chata juvenis exibe uma alometria positiva em relação ao

tamanho do corpo (HABEGGER et al., 2012), sugerindo que essa espécie seja provavelmente capaz de consumir itens alimentares mecanicamente desafiadores em estágios de vida iniciais (KOLMANN & HUBER, 2009).

Algumas espécies de tubarão são consideravelmente mais suscetíveis à pressão pesqueira do que outras devido ao seu elevado grau de fidelidade a regiões específicas, as quais são preferencialmente utilizadas como áreas de berçário, acasalamento ou alimentação (HUETER et al., 2005). Conseqüentemente, a captura pela pesca pode ser responsável por reduzir localmente as populações das espécies mais residentes, um efeito conhecido como “depleção localizada do estoque” (WALKER, 1998). Apesar de uma presença significativamente menor ter sido notada entre os anos de 2008 e 2011, a variação anual total da ocorrência de tubarões cabeça-chata na costa da RMR entre 2005 e 2014 não indicou nenhum sinal de uma possível redução local do estoque dessa espécie, possivelmente devido ao baixo número de tubarões removidos em comparação com outros programas de controle de tubarões em larga escala na África do Sul e Austrália (CLIFF & DUDLEY, 1991; O’CONNELL et al., 2007; FERRETI et al., 2010). Em relação à distribuição espacial, as maiores taxas de captura observadas em BV podem estar relacionadas com a presença de um canal profundo paralelo à costa entre as praias de Piedade e Boa Viagem (HAZIN; BURGESS; CARVALHO; 2008; HAZIN & AFONSO, 2013), o qual contribui para uma maior complexidade de hábitat nessa região em comparação com a praia do Paiva (AFONSO; ANDRADE; HAZIN; 2014). Além disso, as maiores capturas de tubarões cabeça-chata pelas linhas de espera podem estar associadas com a preferência da espécie por águas mais rasas (COMPAGNO 2001; CARLSON et al., 2010). Na verdade, como as linhas de espera operam de maneira bastante similar aos espinhéis, não é esperada uma maior capturabilidade para esse aparelho de pesca. A principal diferença entre ambos os aparelhos em relação à sua operacionalidade refere-se ao fato das linhas de espera serem colocadas mais próximas da costa do que os espinhéis. Outros fatores comportamentais não controlados por esse estudo podem estar envolvidos nessa tendência, tais como os tubarões cabeça-chata evitarem a isca do espinhel devido a uma maior facilidade em perceber esse aparelho de pesca em comparação com as linhas de espera, uma vez que estas são colocadas em águas mais rasas e provavelmente com menor visibilidade.

Há uma maior probabilidade dos tubarões cabeça-chata ocorrerem na costa da RMR durante o verão, e tal padrão sazonal pode estar relacionado aos efeitos da TSM e da pluviosidade

na ocorrência de tubarões, sem diferenças significantes na proporção sexual provavelmente devido ao pequeno número de espécimes capturados. De fato, foi verificada uma maior ocorrência de tubarões cabeça-chata de acordo com TSM mais elevadas e menores índices de chuva, características típicas do período de verão.

O fluxo das marés é um fator responsável por influenciar os movimentos dos tubarões cabeça-chata em áreas costeiras (MCCORD & LAMBERTH, 2009), conseqüentemente, períodos de lua cheia e lua nova, quando comumente são registradas as maiores amplitudes de maré, podem ser responsáveis por promover uma maior aproximação de tubarões cabeça-chata da costa. Entretanto, houve uma maior ocorrência de *C. leucas* na costa da RMR apenas durante períodos de lua cheia, sugerindo então que a luminosidade, ao invés de apenas a amplitude de maré, possa ser responsável pela maior taxa de captura nessa fase lunar. Fatores físico-químicos, tais como salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido são responsáveis por influenciar a distribuição de *C. leucas* em ambientes de água doce (ORTEGA et al., 2009). Apesar da ocorrência de tubarões cabeça-chata ser mais provável com ventos fracos ($< 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) e fortes ($> 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), a maior parte dos dados empíricos esteve distribuída entre velocidades de 0 a $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, sugerindo uma influência mais pronunciada dos ventos mais fracos sobre a ocorrência de *C. leucas*.

É pouco provável, entretanto, esclarecer se a maior abundância relativa de tubarões cabeça-chata no período de verão, quando os ventos são mais fracos, a temperatura é maior, e a pluviosidade é menor, está relacionada ao seu ciclo migratório ou se é diretamente influenciado por essas variáveis ambientais e em qual dimensão.

2.5. CONCLUSÃO

Os tubarões cabeça-chata são altamente suscetíveis aos impactos antrópicos sobre os ambientes costeiros uma vez que possuem um elevado nível de dependência desses ambientes ao longo de todo o seu ciclo de vida. Além disso, mesmo dificilmente sendo o alvo principal da pesca ao longo da costa brasileira, a atividade pesqueira nesta região pode vir a causar um impacto significativamente negativo sobre as populações de *C. leucas* afetadas devido ao seu caráter residente.

Devido à sua baixa abundância local podemos considerar que a RMR não abriga uma população residente de *C. leucas* e que a presença desses tubarões nesta região deverá estar relacionada com os padrões de movimentação da espécie ao longo da plataforma continental

brasileira, provavelmente regulados por processos biológicos tais como atividade predatória ou reprodutiva. As alterações morfológicas descritas no presente estudo reforçam ainda a provável suscetibilidade dos tubarões cabeça-chata às interferências antropogênicas sobre a zona costeira, a exemplo da poluição. Devido ao elevado número de estômagos vazios não foi possível fazer inferências mais detalhadas a respeito da dieta da espécie na região.

As características e tendências descritas neste capítulo sobre a bioecologia dos tubarões *C. leucas* capturados na costa da RMR, de uma maneira geral, estão em concordância com outros estudos realizados anteriormente em outras regiões e contribuem para um importante acréscimo de informações científicas a respeito dessa espécie de tubarão, uma vez que muito pouco ainda se conhece a respeito da ecologia dos tubarões cabeça-chata no Oceano Atlântico Sul Ocidental.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, A. S., ANDRADE, H. A. & HAZIN, F. H. V. Structure and Dynamics of the Shark Assemblage off Recife, Northeastern Brazil. **PLOS ONE**, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0102369>>. Acesso em: 08 out. 2014.
- AL-HASSAN, J. M., AFZAL, M., RAO, C. V. N. & FAYAD, S. Petroleum hydrocarbon pollution. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 65, n. 3, p. 391-398, 2000.
- AMORIM, A. F. ARFELLI, C. A. & FAGUNDES, L. Pelagic elasmobranchs caught by longliners off southern Brazil during 1974-97: an overview. **Marine and Freshwater Research**, v. 49, n. 7, p. 621-632, 1998.
- ANDERSON, W. G., GOOD, J. P., PILLANS, R. D., HAZON, N. & FRANKLIN, C. E. Hepatic urea biosynthesis in the euryhaline elasmobranch *Carcharhinus leucas*. **Journal of Experimental Zoology Part A: Comparative Experimental Biology**, v. 303, n. 10, p. 917-921, 2005.
- ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Profile for DDT, DDE and DDD. US Department of Health and Human Services. **Public Health Service**, 2002, n. 497.
- AZEVEDO-SILVA, C. E., AZEREDO, A., LAILSON-BRITO, J., TORRES, J. P. M. & MALM, O. Polychlorinated biphenyls and DDT in swordfish (*Xiphias gladius*) and blue shark (*Prionace glauca*) from Brazilian coast. **Chemosphere**, v. 67, n. 9, p. 48-53, 2007.
- AZEVEDO-SILVA, C. E., AZEREDO, A., DIAS, A. C. L. D., COSTA, P., LAILSON-BRITO, J., MALM, O., GUIMARÃES, J. R. D. & TORRES, J. P. M. Organochlorine compounds in sharks from the Brazilian coast. **Marine Pollution Bulletin**, v. 58, n. 2, p. 294-298, 2009.

BALLANTYNE, J. S. Jaws: the inside story. The metabolism of elasmobranch fishes. **Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology**, v. 118, n. 4, p. 703-742, 1997.

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Instituto Nacional de Meteorologia. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 23 ago. 2014.

BEAUDRY, M. C., HUSSEY, N. E., MCMEANS, B. C. MCLEOD, A. M., WINTNER, S. P., CLIFF, G., DUDLEY, S. F. J. & FISK, A. T. Comparative organochlorine accumulation in two ecologically similar shark species (*Carcharodon carcharias* and *Carcharhinus obscurus*) with divergent uptake based on different life history. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 34, n. 9, p. 2051-2060, 2015.

BEST, D. J. & ROBERTS, D. E. Algorithm AS 89: The upper tail probabilities of Spearman's rho. **Applied Statistics**, v. 24, n. 3, p. 377-379, 1975.

BENGTSSON, B. E. Biological variables, especially skeletal deformities in fish, for monitoring marine pollution. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 286, n. 1015, p. 457-464, 1979.

BORNATOWSKI, H., WEDEKIN, L. L., HEITHAUS, M., MARCONDES, M. C. C. & ROSSI-SANTOS, M. R. Shark scavenging and predation on cetaceans at Abrolhos Bank, eastern Brazil. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 92, n. 8, p. 1767-1772, 2012.

BRANSTETTER, S. & STILES, R. Age and growth estimates of the bull shark, *Carcharhinus leucas*, from the northern Gulf of Mexico. **Environmental Biology of Fishes**, v. 20, n. 3, p. 169-181, 1987.

CARLSON, J. K., RIBERA, M. M., CONRATH, C. L., HEUPEL, M. R. & BURGESS, G. H. Habitat use and movement patterns of bull sharks *Carcharhinus leucas* determined using pop-up satellite archival tags. **Journal of Fish Biology**, v. 77, n. 3, p. 661-675, 2010.

CHAPMAN, D. D., BABCOCK, E. A., GRUBBER, S. H., DIBATTISTA, J. D., FRANKS, B. R., KESSEL, S. A., GUTTRIDGE, T., PIKITCH, E. K. & FELDHEIM, K. A. Long-term natal site-fidelity by immature lemon sharks (*Negaprion brevirostris*) at a subtropical island. **Molecular Ecology**, v. 18, n. 16, p. 3500-3507, 2009.

CLARK, E. & VON SCHMIDT, K. Sharks of the central Gulf coast of Florida. **Bulletin of Marine Science**, v. 15, n. 1, p. 13-83, 1965.

CLIFF, G. & DUDLEY, S. F. J. Sharks caught in the protective nets off Natal, South Africa. 4. The bull shark *Carcharhinus leucas* Valenciennes. **South African Journal of Marine Science**, v. 10, n. 1, p. 253-270, 1991.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. 2 v.

COMPAGNO, L. J. V. **FAO species catalogue**. Sharks of the world: An annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. v. 4, parte II, p. 478-481, 1984.

COMPAGNO, L. J. V. **Sharks of the world**: an annotated and illustrated catalogue of shark species known to date. 2001. v. 2.

COMPAGNO, L. J. V., DANDO, M. & FOWLER, S. **A field guide to the sharks of the world**. London, UK. 2005.

CONOVER, W. J. Kolmogorov-Smirnov test. **Practical Nonparametric Statistics**. 1971. p. 295-314.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/downloadBDM>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

CRUZ-MARTÍNEZ, A. C., CARRARA, X. C. & FUENTES, V. A. Age and growth of the bull shark, *Carcharhinus leucas*, from Southern Gulf of Mexico. **Journal of Northwest Atlantic Fishery Science**, v. 35, p. 367-374, 2004.

CURTIS, T. H. **Distribution, movements, and habitat use of bull sharks (*Carcharhinus leucas*, Müller and Henle 1839) in the Indian River Lagoon system, Florida**. 2008. Dissertação de Mestrado, University of Florida, Gainesville, USA.

DALY, R., SMALE, M. J., COWLEY, P. D. & FRONEMAN, P. W. Residency patterns and migration dynamics of adult bull sharks (*Carcharhinus leucas*) on the east coast of South Africa. **PLOS ONE**, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0109357>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

DELPANI, S. M., DELI ANTONI, M. Y., BARBINI, S. A. & FIGUEROA, D. E. First record of dicephalic specimen of tope *Galeorhinus galeus* (Elasmobranchii: Triakidae). **Journal of Fish Biology**, v. 78, n. 3, p. 941-944, 2011.

DOWD, W. W. Dogfish rectal gland. In: FARRELL, A. P. (Org.). **Encyclopedia of fish physiology: from genome to environment**. Academic Press, 2011. p. 1429-1436.

EISSA, A. E., MOUSTAFA, M., EL-HUSSEINY, I. N., SAEID, S., SALEH, O. & BORHAN, T. Identification of some skeletal deformities in freshwater teleosts raised in Egyptian aquaculture. **Chemosphere**, v. 77, n. 3, p. 419-425, 2009.

ELLIS, J. R. An abnormal thornback ray *Raja clavata* with additional pectoral fins. **Transactions of the Suffolk Naturalist's Society**, v. 41, p. 31–37, 2005.

ELLIS, J. R. & SHACKLEY, S. E. The reproductive biology of *Scyliorhinus canicula* in the Bristol Channel, U.K. **Journal of Fish Biology**, v. 51, n. 2, p. 361–372, 1997.

- FERRETI, F., WORM, B., BRITTEN, G. L., HEITHAUS, M. R. & LOTZE, H. K. Patterns and ecosystem consequences of shark declines in the ocean. **Ecology Letters**, v. 13, n. 8, p. 1055-1071, 2010.
- FISHER, R. A. Confidence limits for a cross-product ratio. **Australian Journal of Statistics** v. 4, n. 1., p. 41-41, 1962.
- FROESCHKE, J. T., STUNZ, G. W. & WILDHABER, M. L. Environmental influences on the occurrence of coastal sharks in estuarine waters. **Marine Ecology Progress Series**, v. 407, p. 279–292, 2010.
- GUNKEL, G., KOSMOL, J., SOBRAL, M., ROHN, H., MONTENEGRO, S. & AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution – case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 180, n. 1, p. 261-269, 2007.
- HABEGGER, M. L., MOTTA, P. J., HUBER, D. R. & DEAN, M. N. Feeding biomechanics and theoretical calculations of bite force in bull sharks (*Carcharhinus leucas*) during ontogeny. **Zoology**, v. 115, n. 6, p. 354-364, 2012.
- HASTIE, T. & TIBSHIRANI, R. **Generalized Additive Models**. Londres: CRC Press, 1990. 43 v.
- HAZIN, F. H. V. & AFONSO, A. S. A *green* strategy for shark attack mitigation off Recife, Brazil. **Animal Conservation**, v. 17, n. 4, p. 287-296, 2013.
- HEITHAUS, M. R. Predator-prey and competitive interactions between sharks (order Selachii) and dolphins (suborder Odontoceti), a review. **Journal of Zoology**, v. 253, n. 1, p. 53-68, 2001.
- HEITHAUS, M. R., BURKHOLDER, D., HUETER, R. E., HEITHAUS, L. I., PRATT, H. L. & CARRIER, J. C. Spatial and temporal variation in shark communities of the lower Florida Keys and evidence for historical population declines. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 64, n. 10, p. 1302-1313, 2007.
- HEUPEL, M. R., SIMPFENDORFER, C. A. & BENNET, M. B. Skeletal deformities in elasmobranchs from Australian waters. **Journal of Fish Biology**, v. 54, n. 5, p. 1111-1115, 1999.
- HEUPEL, M. R. & SIMPFENDORFER, C. A. Movement and distribution of young bull sharks *Carcharhinus leucas* in a variable estuarine environment. **Aquatic Biology**, v. 1, p. 277-289, 2008.
- HOENING, J. M. & WALSH, A. H. Skeletal lesion and deformities in large sharks. **Journal of Wildlife Diseases**, v. 19, n.1, p. 27-33, 1983.
- HOLLANDER, M. & WOLFE, D. A. Kendall and Spearman tests. **Nonparametric Statistical Methods**. New York, 1973. p. 185-194.

HOLMES, B. J., SUMPTON, W. D., MAYER, D. G., TIBBETTS, I. R., NEIL, D. T. & BENNETT, M. B. Declining trends in annual catch rates of the tiger shark (*Galeocerdo cuvier*) in Queensland, Australia. **Fisheries Research**, v. 129, n. 130, p. 38-45, 2012.

HUETER, R. E., HEUPEL, M. R., HEIST, E. J. & KEENEY, D. B. Evidence of philopatry in sharks and implications for the management of shark fisheries. **Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science**, v. 35, p. 239-247, 2005.

JANECH, M. G. & PIERMARINI, P. M. Renal water and solute excretion in the Atlantic stingray in fresh water. **Journal of Fish Biology**, v. 61, n. 4, p. 1053-1057, 2002.

JANECH, M. G., FITZGIBBON, W. R., PLOTH, D. W., LACY, E. R. & MILLER, D. H. Effect of low environmental salinity on plasma composition and renal function of the Atlantic stingray, a euryhaline elasmobranch. **American Journal of Physiology-Renal Physiology**, v. 291, n. 4, p. 770-780, 2006.

JEFFREE, R. A., OBERHANSLI, F., TEYSSIE, J. L., FOWLER, S. W. Maternal transfer of anthropogenic radionuclides to eggs in small shark. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 147, p. 43-50, 2015.

JENSON, N. H. Reproduction of the bull shark, *Carcharhinus leucas*, in the lake Nicaragua-Rio San Juan System. **Investigations of the Ichthyofauna of Nicaraguan Lakes**, v. 1, n. 1, p. 539-559, 1976.

JOHANSON, Z., BOISVERT, C., MAKSIMENKO, A., CURRIE, P. & TRINAJSTIC, K. Development of the Synarcual in the Elephant Sharks (Holocephali; Chondrichthyes): implications for vertebral formation and fusion. **PLOS ONE**, 2015. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0135138>>. Acesso em: 15 out. 2015.

KARL, S. A., CASTRO, A. L. F., LOPEZ, J. A., CHARVET, P. & BURGESS, G. H. Phylogeography and conservation of the bull shark (*Carcharhinus leucas*) inferred from mitochondrial and microsatellite DNA. **Conservation Genetics**, v. 12, n. 2, p. 371-382, 2011.

KOHLER, N. E. & TURNER, P. A. Shark tagging: a review of conventional methods and studies. In: TRICAS, T. C. & GRUBER, S. H (Org.). **The behavior and sensory biology of elasmobranch fishes: an anthology in memory of Donald Richard Nelson**. Springer Netherlands, 2001. p. 191-224. 20 v.

KOLMANN, M. A. & HUBER, D. R. Scaling of feeding biomechanics in the horn shark *Heterodontus francisci*: ontogenetic constraints on durophagy. **Zoology**, v. 112, n. 5, p. 351-36, 2009.

LEE, S. J., TANABE, S., TAKEMOTO, N. & KUBODERA, T. Organochlorine residues in deep-sea organisms from Suruga Bay, Japan. **Marine Pollution Bulletin**, v. 34, n. 4, p. 250-258, 1997.

LIRA, L., WOR, C., HAZIN, F. H. V., JÚNIOR, H. A. C. B. & SANTOS, J. C. P. Estudo de correntes marinhas por meio do lançamento de cartões de deriva no litoral do Estado de Pernambuco, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 43, n. 1, p. 30-37, 2010.

LIU, H. & CHAN, K. S. Introducing COZIGAM: An R Package for Unconstrained and Constrained Zero-Inflated Generalized Additive Model Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 35, n. 11, p. 1-26, 2010.

MARTIN, R. A. Conservation of freshwater and euryhaline elasmobranchs: a review. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 85, n. 5, p. 1049-1073, 2005.

MATICH, P., HEITHAUS, M. R. & LAYMAN, C. A. Size-based variation in intertissue comparisons of stable carbon and nitrogen isotopic signatures of bull sharks (*Carcharhinus leucas*) and tiger sharks (*Galeocerdo cuvier*). **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 67, n. 5, p. 877-885, 2010.

MAZZOLENI, R. C. & SCHWINGEL, P. R. Elasmobranch species landed in Intajaí Harbor, Southern Brazil. **Notas Técnicas FACIMAR**, v. 3, p. 111-118, 1999.

MCCORD, M. E. & LAMBERTH, S. J. Catching and tracking the world's largest Zambezi (bull) shark *Carcharhinus leucas* in the Breede Estuary, South Africa: the first 43 hours. **African Journal of Marine Science**, v. 31, n. 1, p. 107-111, 2009.

MCDONALD, J. H. **Handbook of biological statistics**. Baltimore: Sparky House Publishing, 2009. 2 v.

MENEZES, T. S., SANTOS, F. N. & PEREIRA, C. W. Elasmobranch fish fauna off Sergipe State, Brazil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 38, p. 79-83, 2005.

MOORE, A. B. M. Morphological abnormalities in elasmobranchs. **Journal of Fish Biology**, doi:10.1111/jfb.12680, 2015.

MONTOYA, R. V. & THORSON, T. B. The bull shark (*Carcharhinus leucas*) and largetooth sawfish (*Pristis perotteti*) in Lake Bayano, a tropical man-made impoundment in Panama. **Environmental Biology of Fishes**, v. 7, n. 4, p. 341-347, 1982.

NAYLOR, G. J. P., CAIRA, J. N., JENSEN, K., ROSANA, K. A. M., WHITE, W. T. & LAST, P. R. A DNA sequence-based approach to the identification of shark and ray species and its implications for global elasmobranch diversity and parasitology. **Bulletin of the American Museum of Natural History**, v. 367, 1-262, 2012.

NEER, J. A., THOMPSON, B. A. & CARLSON, J. K. Age and growth of *Carcharhinus leucas* in the northern Gulf of Mexico: incorporating variability in size at birth. **Journal of Fish Biology**, v. 67, n. 2, p. 370-383, 2005.

- NORIEGA, C. E. D. & ARAUJO, M. Nitrogen and phosphorus loading in coastal watersheds in northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 56, p. 871-875, 2009.
- NORIEGA, C. E. D. & ARAUJO, M. Nutrient budgets (C, N and P) and trophic dynamics of a Brazilian tropical estuary: Barra das Jangadas. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 83, n. 2, p. 441-456, 2011.
- NOVELI, Y. S. & MESQUITA, H. S. L. The Cananéia Lagoon Estuarine System, São Paulo, Brazil. **Estuarine Research Federation**, v. 13, n. 2, p. 193-203, 1990.
- O'CONNELL, M. T., SHEPHERD, T. D., O'CONNELL, A. M. U. & MYERS, R. A. Long-term declines in two apex predators, bull sharks (*Carcharhinus leucas*) and alligator gar (*Atractosteus spatula*), in Lake Pontchartrain, an oligohaline estuary in Southeastern Louisiana. **Estuaries and Coasts**, v. 30, n. 4, p. 567-574, 2007.
- ORTEGA, L. A., HEUPEL, M. R., BEYNEN, P. V. & MOTTA, P. J. Movement patterns and water quality preferences of juvenile bull sharks (*Carcharhinus leucas*) in a Florida estuary. **Environmental Biology of Fishes**, v. 84, n. 4, p. 361-373, 2009.
- PATTILLO, M. E., CZAPLA, T. E., NELSON, D. M. & MONACO, M. E. Distribution and abundance of fishes and invertebrates in Gulf of Mexico estuaries. In: **Species life history summaries**, 1997. p. 377. 2 v.
- PILLANS, R. D., GOOD, J. P., ANDERSON, W. G., HAZON, N. & FRANKLIN, C. E. Freshwater to seawater acclimation of juvenile bull sharks (*Carcharhinus leucas*): plasma osmolytes and K^+/K^+ -ATPase activity gill, rectal gland, kidney and intestine. **Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology**, v. 175, n. 1, p. 37-44, 2005.
- PILLANS, R. D., ANDERSON, W. G., GOOD, J. P., HYODO, S. & TAKEI, Y. Plasma and erythrocyte solute properties of juvenile bull sharks, *Carcharhinus leucas*, acutely exposed to increasing environmental salinity. **Journal of experimental marine biology and ecology**, v. 331, n. 2, p. 145-157, 2006.
- PIMENTEL, M. S., FALEIRO, F., DIONÍSIO, G., REPOLHO, T., POUSSÃO-FERREIRA, P., MACHADO, J. & ROSA, R. Defective skeletogenesis and oversized otoliths in fish early stages in a changing ocean. **The Journal of experimental biology**, v. 217, n. 12, p. 2062-2070, 2014.
- PORTNOY, D. S., MCDOWELL, J. R., HEIST, E. J., MUSICK, J. A. & GRAVES, J. E. World phylogeography and male-mediated gene flow in the sandbar shark, *Carcharhinus plumbeus*, in the western North Atlantic and Gulf of Mexico. **Molecular Ecology**, v. 19, n. 10, p. 1994-2010, 2010.
- PRATT, H. L. & CARRIER, J. C. A review of elasmobranch reproductive behavior with a case study on the nurse shark, *Ginglymostoma cirratum*. **Environmental Biology of Fishes**, v. 60, n. 3, p. 157-188, 2001.

QUEIROZ, E. L. & REBOUÇAS, S. C. **Tubarão – Quem tu és?** Salvador: Universidade Federal da Bahia, GECET – Grupo de estudos de cetáceos, 1995.

RAMIREZ-AMARO, S. R., GONZALEZ-BARBA, G. GALVAN-MAGANA, F. & CARTAMIL, D. First record of abnormal cephalic horns in the California bat ray *Myliobatis californica*. **Marine Biodiversity Records**, v. 6, doi:10.1017/S1755267213000146, 2013.

REILY, B. D., CRAMP, R. L., WILSON, J. M., CAMPBELL, H. A. & FRANKLIN, C. E. Branchial osmoregulation in the euryhaline bull shark, *Carcharhinus leucas*: a molecular analysis of ion transporters. **Journal of Experimental Biology**, v. 214, n. 17, p. 2883-2895, 2011.

RODRIGUES-FILHO, L. F. S., ROCHA, T. C., RÊGO, P. S., SCHNEIDER, H., SAMPAIO, I. & VALLINOTO, M. Identification and phylogenetic inferences on stocks of sharks affected by the fishing industry off the Northern coast of Brazil. **Genetics and Molecular Biology**, v. 32, n. 2, p. 405-413, 2009.

SADOWSKY, V. Notes on the bull shark *Carcharhinus leucas* in the lagoon region of Cananéia, Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 20, n. 2, p. 71-78, 1971.

SANDNESS, K. Vitamin C in fish nutrition – a review. **Fiskeridirektoratets skrifter**, v. 4, n. 1, p. 3-32, 1991.

SHARK YEAR MAGAZINE. **Dissection of a bull shark with spinal deformity in Mexico**. 2014. Disponível em: <<http://sharkyear.com/2014/video-dissection-of-bull-shark-with-spinal-deformity-in-mexico.html>>. Acesso em: 07 nov. 2014.

SIMPFENDORFER, C. & BURGESS, G. H. *Carcharhinus leucas*. **The IUCN Red List of Threatened Species**, 2009. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/details/39372/0>>. Acesso em: 29 out. 2015.

SLOOF, W. Skeletal abnormalities in fish from polluted surface waters. **Aquatic Toxicology**, v. 2, n. 3, p.157-173, 1982.

SNELSON, F. F., MULLIGAN, T. J. & WILLIAMS, S. E. Food habits, occurrence and population structure of the bull shark, *Carcharhinus leucas* in Florida coastal lagoons. **Bulletin of Marine Science**, v. 34, n. 1, p. 71-80, 1984.

SOLIAR, T. L. Dorsal fin in the White Shark, *Carcharodon carcharias*: a dynamic stabilizer for fast swimming. **Journal of Morphology**, v. 263, n. 1., p. 1-11, 2005.

SOUZA, A. D. G. & TUNDISI, J. G. Water quality in watershed of the Jaboatão River (Pernambuco, Brazil): a case study. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 46, n. 4, p. 711-721, 2003.

SPIESS, A. N. qPCR: Modeling and analysis of real-time PCR data. **Pacote do R**, 2014.

STRANDBERG, B., BANDH, C., VAN BAVEL, B., BEGQVIST, P. A., BROMAN, D., NAF, C., PETTERSEN, H. & RAPPE, C. Concentrations, bio magnification and spatial variation of organochlorine compounds in a pelagic food web in the northern part of the Baltic Sea. **The Science of the Total Environment**, v. 217, n. 1, p. 143-154, 1998.

STREICH, M & PETERSON, D. L. Evidence of a bull shark nursery in the Altamaha river estuary, Georgia. **Proceedings of the Annual Conference of Southeast Associated Fish and Wildlife Agencies**. v. 65, p. 83-88, 2011.

SZPILMAN, M. **Tubarões no Brasil: guia prático de identificação**. Rio de Janeiro: Instituto Aqualung, 2004. ed. Aqualittera.

TAM, W. L., WONG, W. P., LOONG, A. M., HIONG, K. C., CHEW, S. F., BALLANTYNE, J. S. & IP, Y. K. The osmotic response of the Asian freshwater stingray (*Himantura signifer*) to increased salinity: a comparison with marine (*Taeniura lymma*) and Amazonian freshwater (*Potamotrygon motoro*) stingrays. **Journal of Experimental Biology**, v. 206, n. 17, p. 2931-2940, 2003.

TANIUCHI, T. & YANAGISAWA, F. Albinism and lack of second dorsal fin in an adult tawny nurse shark, *Nebrius concolor*, from Japan. **Japanese Journal of Ichthyology**, v. 34, n. 3, p. 393-395, 1987.

THORBURN, D. C. & MORGAN, D. L. The northern river shark *Glyphis* sp. C. (Carcharhinidae) discovered in Western Australia. **Zootaxa**, v. 685, p. 1-8, 2004.

THORSON, T. B. Status of bull shark, *Carcharhinus leucas*, in Amazon River. **Copeia**, p. 601-605, 1972.

THORSON, T. B., COWAN, C. M. & WATSON, D. E. Body fluid solutes of juveniles and adults of the euryhaline bull shark *Carcharhinus leucas* from freshwater and saline environments. **Physiological Zoology**, p. 29-42, 1973.

THORSON, T. B. & LACY, E. J. Age, growth rate and longevity of *Carcharhinus leucas* estimated from tagging and vertebral rings. **Copeia**, p. 110-116, 1982.

TILLET, B. J., MEEKAN, M. G., FIELD, I. C., THORBURN, D. C. & OVENDEN, J. R. Evidence for reproductive philopatry in the bull shark *Carcharhinus leucas*. **Journal of Fish Biology**, v. 80, n. 6, p. 2140-2158, 2012.

TREMAIN, D. M., HARNDEN, C. W. & ADAMS, D. H. Multidirectional movements of sportfish species between an estuarine no-take zone and surrounding waters of the Indian River Lagoon, Florida. **Fishery Bulletin**, v. 102, n. 3, p. 533-544, 2004.

VENABLES, W. N. & RIPLEY, B. D. **Modern applied statistics with S**. Springer Science & Business Media, 2002.

WAGENMAKERS, E. J. & FARREL, S. AIC model selection using Akaike Weights. **Psychonomic bulletin & review**, v. 11, n. 1, p. 192-196, 2004.

WAGNER, C. M., RICE, P. H. & PEASE, A. P. First record of dicephalia in a bull shark *Carcharhinus leucas* (Chondrichthyes: Carcharhinidae) fetus from the Gulf of Mexico, U.S.A. **Journal of Fish Biology**, v. 82, n. 4, p. 1419–1422, 2013.

WALKER, T. I. Can shark resources be harvested sustainably? A question revisited with a review of shark fisheries. **Marine and Freshwater Research**, v. 49, n. 7, p. 553-572, 1998.

WERRY, J. M., LEE, S. Y., OTWAY, N. M., HU, Y. & SUMPTON, W. A multi-faceted approach for quantifying the estuarine-nearshore transition in the life cycle of the bull shark, *Carcharhinus leucas*. **Marine and Fresh water Research**, v. 62, n. 12, p. 1421-1431, 2011.

WERRY, J. M., LEE, S. Y., LEMCKERT, C. J. & OTWAY, N. M. Natural or Artificial? Habitat-use by the bull shark, *Carcharhinus leucas*. **PLOS ONE**, 2012. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0049796>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

WHO – World Health Organization. Environmental Health Criteria: DDT and its Derivatives. **World Health Organization Distribution and Sales**, 1979. 9 v.

WILLIAMS, G. Note on the occurrence of a fin abnormality in the thorn backed ray (*Raja clavata*). **Irish Naturalists Journal**, v. 5, p. 223–225, 1935.

WINTNER, S. P., DUDLEY, S. F. J., KISTNASAMY, N. & EVERETT, B. Age and growth estimates for the Zambezi Shark, *Carcharhinus leucas*, from the east coast of South Africa. **Marine and Freshwater Research**, v. 53, n. 2, p. 557-566, 2002.

YEISER, B. G., HEUPEL, M. R. & SIMPFENDORFER, C. A. Occurrence, home range and movement patterns of juvenile bull (*Carcharhinus leucas*) and lemon (*Negaprion brevirostris*) sharks within a Florida estuary. **Marine and Freshwater Research**, v. 59, n. 6, p. 489-501, 2008.

3. CAPÍTULO 2. MOVIMENTAÇÃO DO TUBARÃO CABEÇA-CHATA NA COSTA BRASILEIRA



Tubarão cabeça-chata marcado sendo transportado para longe da costa.

3.1. INTRODUÇÃO

Entre as principais dificuldades em se estudar os tubarões no seu hábitat natural destacam-se o seu grande tamanho, a sua capacidade de percorrer grandes distâncias, e o fato de que esses animais vivem em um ambiente que dificulta a sua observação direta (SUNDSTRÖM et al., 2001). Apesar dos estudos de comportamento dos tubarões na natureza utilizando diferentes metodologias de observação, tais como a direta através de mergulho (NELSON, 1977), aéreas (GRUBER; NELSON; MORRISSEY; 1988) e técnicas fotográficas (ANDERSON & GOLDMAN, 1996), terem sido responsáveis por fornecer informações importantes a respeito dos padrões de movimentação desses animais, os trabalhos de marcação são capazes de fornecer esse tipo de informação em uma escala geográfica e temporal muito maior. Os trabalhos envolvendo a marcação de tubarões foram iniciados na década de 1920, tendo sido responsáveis por estudos de diversos aspectos da história de vida desses animais, tais como a composição de espécies, proporção sexual, distribuição espacial e temporal, migrações, padrões de movimentação, taxas de movimentação, delimitação de áreas de berçário, períodos de maturação, índices de abundância relativa e o reconhecimento de indivíduos (KOHLER & TURNER, 2001). Entretanto, existe uma necessidade de melhor se conhecer os padrões diários desses animais e de se obter informações mais detalhadas sobre o seu comportamento (SUNDSTRÖM et al., 2001). Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de novos equipamentos, tais como os transmissores acústicos e por satélite, foi possível a realização de novos trabalhos de telemetria, responsáveis por fornecer informações muito mais detalhadas a respeito dos padrões de comportamento dos tubarões (HAMMERSCHLAG et al., 2010). Apesar de eventualmente ser necessário capturar e manusear os animais para que seja possível inserir os transmissores de forma cirúrgica ou fixados externamente, os indivíduos marcados tendem a recuperar o seu comportamento natural dentro de apenas algumas horas (SCARIOTTA & NELSON, 1977; NELSON et al., 1997; LOWE; HOLLAND; WOLCOTT; 1998; HOLLAND et al., 1999), em um dia (MCKIBBEN & NELSON, 1986; GRUBER et al., 1988; SUNDSTRÖM et al., 1998) ou após vários dias (12 ± 2) em liberdade (AFONSO & HAZIN, 2014), provavelmente devido aos diferentes níveis de estresse causados pelas diferentes metodologias empregadas.

Anteriormente aos primeiros trabalhos de marcação, acreditava-se que a presença dos tubarões cabeça-chata no lago Nicarágua e no rio San Juan na Costa Rica estivesse relacionada com a atividade vulcânica do período Pleistoceno Superior, a qual teria sido responsável por

isolar uma baía do Oceano Pacífico formando o lago Nicarágua, aprisionando esses tubarões, que no passado provavelmente habitavam a região costeira adjacente (GILL & BRANSFORD, 1877). Entretanto, trabalhos de marcação nessa região, iniciados em 1966, mostraram que os tubarões cabeça-chata marcados em ambientes marinhos na costa leste da Costa Rica eram recapturados no interior do lago Nicarágua, e que, da mesma maneira, os tubarões marcados no lago Nicarágua também eram recapturados em ambiente marinho, indicando assim que *C. leucas* é uma espécie capaz de migrar entre os dois ambientes e que os tubarões presentes no lago Nicarágua não constituíam uma população geograficamente isolada (THORSON, 1971), como se acreditava.

Estudos de movimentação de tubarões cabeça-chata juvenis utilizando telemetria acústica passiva foram realizados na Flórida (HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; ORTEGA et al., 2009), na região central do Golfo do México (DRYMON et al., 2014) e na Gold Coast australiana (WERRY et al., 2012). Heupel e Simpfendorfer (2008) observaram que, apesar de os juvenis de *C. leucas* no rio Caloosahatchee no sudoeste da Flórida, EUA, ocorrerem em ambientes com salinidades entre 0,1 e 34, esses tubarões tendiam a evitar salinidades abaixo de 7, utilizando áreas com salinidade entre 7 e 20 de maneira mais frequente e sendo geralmente encontrados na porção superior do estuário quando este se encontrava mais salino. Além disso, Ortega et al. (2009) verificaram que as taxas de movimentação e distâncias percorridas por tubarões cabeça-chata juvenis nesse mesmo estuário estavam correlacionadas com variáveis ambientais, tais como temperatura da água, salinidade, oxigênio dissolvido, turbidez e pH. Drymon et al. (2014), por sua vez, estudando juvenis de *C. leucas* na baía de Mobile, na região central do Golfo do México, observaram que a movimentação desses animais apresentou variações espaciais e temporais, além de também sofrer a influência de variáveis ambientais, com uma afinidade por águas quentes (29-32°C), com salinidade moderada (10-11) e águas normóxicas (5-7 mg·L⁻¹). Werry et al. (2012) analisaram a utilização espacial de neonatos e juvenis de *C. leucas* no rio Nerang na região da Gold Coast, Austrália, e em alguns de seus canais secundários, os quais se caracterizam por um grande desenvolvimento urbano nessa região, correspondendo assim a duas regiões com diferentes níveis de impacto antrópico. Os autores observaram que, apesar dos tubarões cabeça-chata utilizarem ambas as regiões, os indivíduos neonatos demonstraram uma preferência pelas áreas com menor grau de impacto antrópico.

Por outro lado, pouco ainda se sabe a respeito dos padrões de movimentação de tubarões cabeça-chata adultos. McCord e Lamberth (2009), utilizando telemetria acústica ativa,

monitoraram durante um período de 43 horas no estuário do rio Breede, na costa sudoeste da África do Sul, o maior tubarão cabeça-chata capturado até hoje, uma fêmea, aparentemente grávida, medindo 400 cm C_T . Esse tubarão foi capturado no canal principal do rio, tendo depois utilizado, na maior parte do tempo, uma região compreendida entre 11-13 km a montante do estuário, onde investigou ativamente diversos barcos de pesca, comportamento considerado como uma estratégia de forrageamento oportunista. Um estudo da movimentação de *C. leucas* adultos em áreas costeiras do Golfo do México identificou que esses tubarões exibiam uma preferência por profundidades < 20 m, demonstrando um comportamento residente com pequenas taxas de deslocamento variando entre 5-6 km·dia⁻¹ e percorrendo uma distância máxima de 1.506 km em 85 dias (CARLSON et al., 2010). Tal padrão de movimentação é compatível com o comportamento residente atribuído a essa espécie em outros estudos anteriores (CLIFF & DUDLEY, 1991; HEUPEL & SIMPFENDORFER, 2008; HEUPEL et al., 2010). Entretanto, estudos mais recentes têm sugerido que talvez os tubarões cabeça-chata não sejam animais tão sedentários como se pensava anteriormente. Tubarões cabeça-chata na costa leste da África do Sul apresentaram períodos de residência intercalados por migrações costeiras em direção a latitudes mais quentes durante o inverno e em direção a temperaturas mais baixas durante o verão, com uma taxa de movimentação máxima de 59 km·dia⁻¹, correspondendo a distâncias anuais de até 3.760 km (DALY et al., 2014). Eventos migratórios em outras espécies de tubarões de grande porte foram relacionados com a atividade reprodutiva (BANSEMER & BENNETT, 2011) e disponibilidade de alimento (KOCK et al., 2013).

Em *C. leucas*, acredita-se que a distância, direção e frequência desses eventos possam apresentar diferentes padrões sexo-específicos (DALY et al., 2014). Uma fêmea grávida de tubarão cabeça-chata medindo 300 cm C_T foi marcada com um transmissor por satélite no arquipélago de Seychelles, no Oceano Índico, e monitorada por um período de 151 dias, durante o qual percorreu uma distância de aproximadamente 10.670 km a uma velocidade média de 0,82 m·s⁻¹. Essa distância correspondeu à migração realizada por esse tubarão, em região oceânica, entre o arquipélago de Seychelles e a costa sudeste de Madagascar, onde se acredita que esse tubarão tenha dado à luz os seus filhotes antes de retornar a Seychelles, onde foi avistada, consideravelmente mais magra, por mergulhadores no momento em que o transmissor foi recuperado (LEA et al., 2015).

Espécies de tubarão costeiras tais como *C. leucas* costumam se agregar em regiões específicas para acasalar, dar à luz os seus filhotes e para maturar (SIMPENDORFER & MILWARD, 1993; HEUPEL; CARLSON; SIMPFENDORFER; 2007), de modo que o grau de segregação entre diferentes regiões, juntamente com o comportamento filopátrico, podem afetar diretamente o nível de divergência genética entre as populações de diferentes áreas geográficas (HUETER et al., 2005). Esta é uma espécie de tubarão altamente suscetível aos impactos antrópicos sobre a região costeira devido à sua dependência desse tipo de habitat (BRUNNSCHWEILER; QUEIROZ; SIMS; 2010; WERRY et al., 2011). Existe evidência de um limitado fluxo gênico entre as populações de tubarão cabeça-chata do Atlântico Norte e Sul, as quais são respectivamente estimadas em aproximadamente 221.000 e 160.000 indivíduos, sugerindo uma subdivisão entre ambos os hemisférios (KARL et al., 2011). Nesse contexto, o presente capítulo aborda os padrões de movimentação de *C. leucas* na costa do Brasil utilizando telemetria por satélite e acústica, descrevendo, pela primeira vez no Atlântico Sul Ocidental, o comportamento de deslocamentos verticais e horizontais de um tubarão cabeça-chata adulto.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

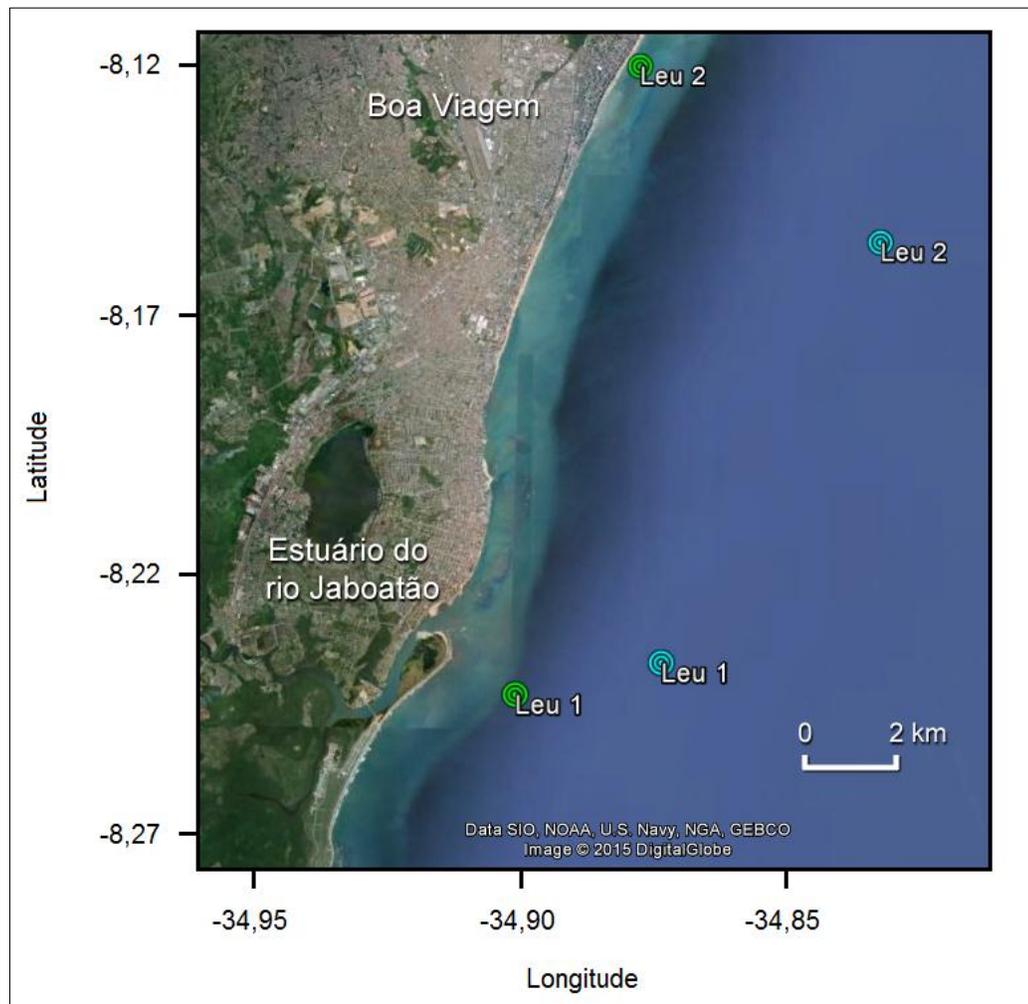
3.2.1. Captura e marcação

O primeiro tubarão cabeça-chata (Leu 1) marcado foi um macho medindo 210 cm C_T , capturado no dia 17 de julho de 2012 com espinhel no PA, próximo ao estuário do rio Jaboatão (8,24°S; 34,91°O), e liberado por volta dos 4,5 km de distância da costa (8,23°S; 34,88°O) (Fig. 3.1). O segundo tubarão (Leu 2), uma fêmea com 248 cm C_T , foi capturado com linha de espera em BV (8,12°S; 34,89°O) no dia 23 de setembro de 2014, a apenas 300 m da praia de Boa Viagem (Fig. 3.2), e liberado a aproximadamente 7,5 km da costa (8,15°S, 34,84°O) (Fig. 3.1).

Os tubarões foram acomodados em piscinas de aproximadamente 3 m de comprimento por 1 m de largura, montadas no convés do B.pq. Sinuelo (Fig. 3.3) a fim de serem marcados e transportados para fora da área de risco, permanecendo com os olhos cobertos por um tecido escuro (Fig. 3.3b) durante todo procedimento, como uma estratégia para reduzir o estresse causado aos animais durante o processo.

Utilizaram-se marcas plásticas contendo numerações específicas para a identificação de cada um dos tubarões, as quais foram aplicadas em sua musculatura dorsal logo abaixo da

primeira nadadeira dorsal (Fig. 3.4). Em seguida, os transmissores acústico e satélite foram inseridos na porção mediana da primeira nadadeira dorsal (Fig. 3.4). Foram utilizados, para ambos os tubarões, transmissores acústicos V16 (Vemco, Halifax, Canada) medindo 68 mm de comprimento e 16 mm de largura, com potência de som entre 150-162 dB e vida útil da bateria de até 10 anos. O Leu 1 foi marcado com um transmissor satélite do tipo mk10 (Wildlife Computers, Redmond WA, USA), medindo 175 mm de comprimento e 40 mm de largura. Para o Leu 2, foi utilizado um transmissor satélite modelo MiniPAT (Wildlife Computers, Redmond WA, USA) de 124 mm de comprimento e 38 mm de diâmetro.



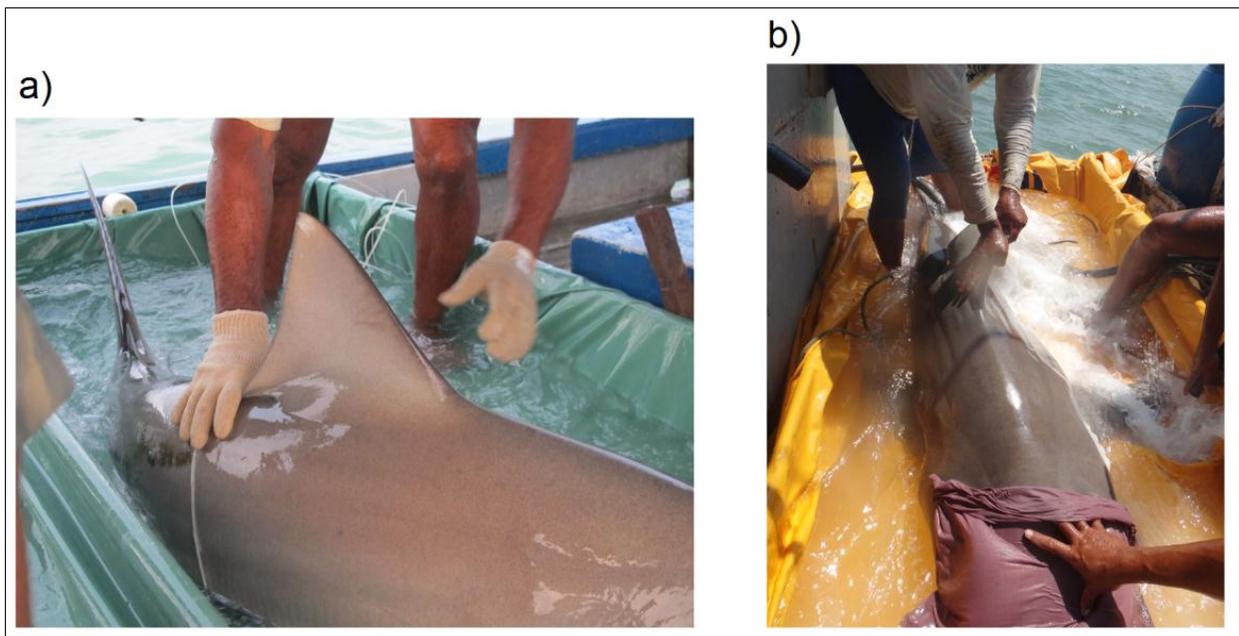
Fonte: Adaptado do Google Earth (2015)

Figura 3.1. Localização dos pontos de captura (verde) e liberação (azul) dos dois tubarões cabeça-chata, Leu 1 e Leu 2, marcados na costa da RMR.



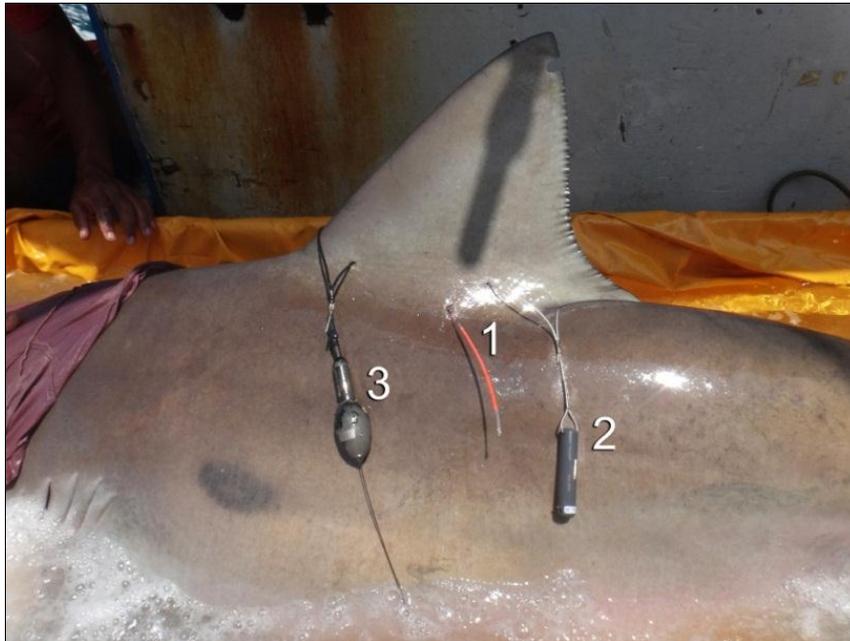
Fonte: Adaptado da ARGOS (2015). (*) B.Pq. Sinuelo

Figura 3.2. Imagem aérea do momento da captura do segundo tubarão cabeça-chata (Leu 2). A linha vermelha corresponde a uma distância de aproximadamente 300 m entre o local de captura e a praia.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.3. Acomodação dos tubarões a) Leu 1 e b) Leu 2 em tanques montados no convés do B.Pq. Sinuelo, a fim de serem marcados e transportados para longe da costa.

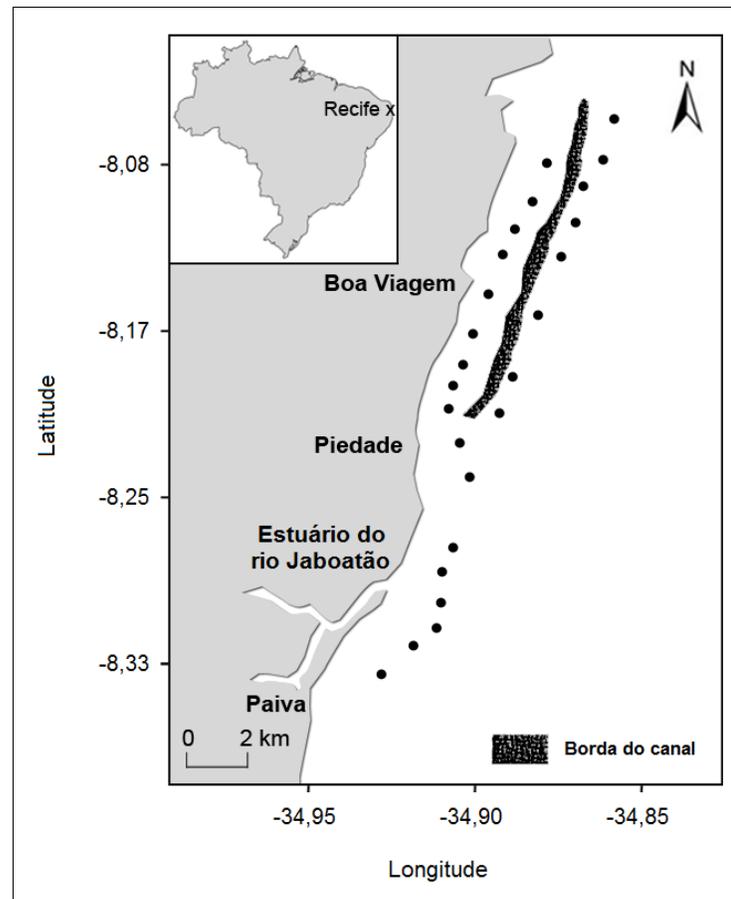


Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.4. Tubarão cabeça-chata Leu 2 marcado e sendo transportado. Detalhe para a 1) marca plástica convencional e os transmissores 2) acústico e 3) por satélite.

3.2.2. Telemetria acústica

Um total de 25 receptores VR2W (Vemco, Halifax, Canada) foram dispostos paralelamente à costa da RMR em profundidades < 14 m, de modo a detectar a presença dos tubarões marcados ao longo da área de estudo (Fig. 3.5), com um raio de detecção entre 250 e 300 m (FERREIRA et al., 2013). Devido à presença de um canal paralelo à costa ao norte da região de monitoramento, uma segunda linha de receptores foi colocada mais próxima da costa, no interior do canal (Fig. 3.5). Os receptores foram amarrados em cabos presos a um lastro e uma boia, de forma a mantê-los verticalmente dispostos na coluna de água, tomando-se o cuidado para que ficassem sempre abaixo da superfície, mesmo nos períodos de maré mais baixa, como uma estratégia para evitar o roubo do equipamento. A substituição das baterias e download dos dados foram realizados a cada 3-6 meses.



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2012)

Figura 3.5. Localização das estações acústicas ao longo da costa da RMR para detecção dos tubarões marcados. Detalhe para o canal paralelo à costa ao norte da região de estudo.

3.2.3. Telemetria por satélite

Ambos os transmissores por satélite utilizados nesse estudo foram do tipo Pop-up Satellite Archival Tag (PSAT), os quais funcionam como uma espécie de datalogger, coletando e armazenando os dados durante um determinado período de monitoramento previamente programado, após o qual o transmissor se desprende do animal e flutua até a superfície, de onde começa então a transmitir os dados sumarizados para os satélites ARGOS. Nos casos onde o transmissor se desprende do animal em região oceânica, ou muito longe do local onde o animal foi liberado, recuperar o equipamento se torna uma missão complicada e geralmente os dados sumarizados baixados a partir da plataforma ARGOS são utilizados para as análises. Por outro lado, nos casos onde o transmissor é recuperado, é possível se obter todos os dados referentes ao período de monitoramento com uma resolução temporal na ordem do segundo ou minuto.

O transmissor mk-10, inserido em Leu 1, foi programado para se soltar do tubarão após um período de monitoramento de 75 dias, enquanto que o transmissor MiniPAT, utilizado para monitorar os movimentos de Leu 2, foi programado para se liberar do tubarão após um período um pouco maior, de 120 dias. Os transmissores registraram dados de profundidade, temperatura e luminosidade a cada segundo, os quais foram sumarizados em conjuntos de dados com intervalos de tempo de 3 h para facilitar o envio aos satélites no final do período de monitoramento. Os dados baixados a partir da plataforma ARGOS incluíram a profundidade e temperaturas mínima e máxima registradas durante o período de monitoramento, além da proporção de tempo em que cada um dos animais permaneceu nos seguintes intervalos de profundidade e temperatura: *i) profundidade*: 0–1, 1–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–40, 40–50, 50–60, 60–80, 80–100, 100–150 e > 150 m; e *ii) temperatura*: 12–15, 15–18, 18–20, 20–21, 21–22, 22–23, 23–24, 24–25, 25–26, 26–27, 27–28, 28–29 e > 29°; organizados em histogramas de tempo por profundidade (TPP) e tempo por temperatura (TPT). Esses sensores são capazes ainda de estimar a localização do animal a partir da luminosidade ambiental. Para isso, os dados coletados pelo transmissor são processados pelos satélites utilizando a duração do dia, e.g. o tempo entre o primeiro e o último registro de luminosidade, para estimar a localização latitudinal, e calculando o meio dia a partir da duração total do dia para estimar a localização longitudinal.

Por ter se desprendido do Leu 2 na costa da RMR, o segundo transmissor foi intensivamente procurado na região indicada pelos satélites ARGOS utilizando o ARGOS AL-1 PTT LOCATOR. Esse equipamento utiliza um receptor programado para monitorar as frequências ARGOS entre 401,61 e 401,69 MHz em estágios de 2,5 kHz, medindo a intensidade do sinal emitido pelo transmissor e o convertendo em uma leitura de voz altamente precisa. Uma antena direcional Yagi acoplada ao equipamento permite apontar o receptor em diferentes direções e utilizar a comparação entre as suas respectivas leituras para selecionar a direção onde o sinal rádio é detectado com maior intensidade.

Os dados de luminosidade do primeiro transmissor foram utilizados para gerar estimativas iniciais de geolocalização do Leu 1 usando o software do fabricante (WC-GPE v. 1.02.005; Wildlife Computers). As estimativas de localização indicando movimentos biologicamente improváveis, e.g. implicando velocidades de natação > 5 m·s⁻¹, foram removidas das análises posteriores. O modelo de estado-espço aplicado através do filtro de Kalman foi utilizado para estimar duas possíveis soluções para descrever os movimentos horizontais desse tubarão. O

primeiro percurso foi constituído apenas pelas geolocalizações iniciais modeladas com o algoritmo disponível no pacote KFTRACK (SIBERT et al., 2012), enquanto que a segunda trajetória correspondeu a uma modelagem realizando correções de TSM, utilizando o pacote UKFSST (NIELSEN et al., 2012). As correções de TSM consistiram em ajustar as posições do tubarão através da comparação entre os valores de TSM registrados pelo transmissor em cada um dos pontos de geolocalização e as médias semanais dos dados de TSM, com resolução de 1 grau de latitude por 1 grau de longitude, obtidos a partir do banco de dados do National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory (NOAA ESRL) (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov>). Além do mais, foram realizadas correções batimétricas em ambos os modelos utilizando as profundidades máximas diárias registradas pelo transmissor para evitar localizar o tubarão em terra ou em isóbatas rasas e inconsistentes com o comportamento de mergulho do tubarão. O filtro de Kalman utilizou os seguintes parâmetros para estimar as geolocalizações do tubarão: I) componente de advecção norte do movimento (nm/dia); II) componente de advecção leste do movimento (nm/dia); III) componente de difusão do movimento (nm^2/dia); IV) erro de estimação longitudinal ($^\circ$); V) erro de estimação latitudinal ($^\circ$); VI) erro de estimação da TSM ($^\circ\text{C}$); VII) erro aleatório na estimativa de longitude ($^\circ$); VIII) erro aleatório na estimativa de latitude ($^\circ$); IX) erro aleatório na estimativa de TSM ($^\circ\text{C}$); X) limite superior da variação de latitude ($^\circ$); XI) número de dias antes do equinócio onde o erro de latitude é máximo (dias); e XII) nível de suavização dos dados de TSM (nm). Os valores iniciais utilizados pelos algoritmos foram iguais a I = 0, II = 0, III = 100, IV = 0, V = 0, VI = 0, VII = 0,5, VIII = 1, IX = 0,1, X = 0,0001, XI = 0 e XII = 200. Diferentes combinações de parâmetros ativos e inativos, além de uma série de diferentes valores iniciais possíveis, foram iterativamente testadas para minimizar a verossimilhança negativa de ambos os modelos. Foi realizado ainda um ajuste nas geolocalizações estimadas pelo UKFSST como um fator de correção biológica, nas circunstâncias em que a posição indicada pelo modelo sugerisse utilização extensiva de habitat oceânico. Foi considerado que o tubarão não utilizou o ambiente oceânico de forma significativa devido não somente ao comportamento preferencialmente costeiro da espécie (CARLSON et al., 2010; DALY et al., 2014) como também à reduzida profundidade máxima utilizada, uma vez que os tubarões cabeça-chata estão geralmente associados à habitats demersais (CLIFF & DUDLEY, 1991; HEITHAUS et al., 2009; ORTEGA et al., 2009). Consequentemente, é pouco provável que a profundidade máxima do tubarão não corresponda à isóbata máxima do local. Para esse

propósito, as localizações do tubarão foram então deslocadas, dentro das respectivas elipses de erro estimadas pelo algoritmo, para a posição mais próxima da plataforma continental, sendo que, em apenas um caso, a elipse de erro compreendeu apenas a região oceânica. Nesse caso, portanto, a correção correspondeu ao ponto mais próximo localizado na isóbata compatível com a profundidade máxima alcançada pelo tubarão nesse respectivo dia. Foram conduzidas duas abordagens a fim de selecionar a trajetória mais provável (TMP) entre as duas soluções possíveis, que mais provavelmente correspondesse à movimentação real do tubarão. Primeiramente, a média semanal dos dados de TSM (resolução espacial $1^\circ \times 1^\circ$) da costa brasileira ($8,0^\circ\text{S}$; $49,5^\circ\text{W}$ – $25,0^\circ\text{S}$; $31,5^\circ\text{W}$) para o período em que o menor valor de TSM foi registrado, e.g. entre 19 e 26 de agosto, foram plotados em um mapa com o objetivo de se comparar visualmente os valores de TSM amostrados pelo transmissor com os valores de TSM amostrados pelos satélites. Em seguida, foram realizados dois testes t pareados, buscando identificar diferenças significativas entre os valores de TSM registrados pelo transmissor, e as médias dos valores semanais de TSM obtidos da NOAA ESRL para as respectivas localizações estimadas por cada um dos modelos. Outro teste t pareado foi ainda realizado com o objetivo de investigar uma possível utilização de habitat estuarino durante um período específico, sugerido por uma brusca redução nos valores de TSM. Para esse propósito, foram comparadas as temperaturas na superfície do mar e nos 8 m de profundidade durante este período. Após selecionar a TMP, as distâncias entre todas as suas localizações foram estimadas com o software GE-Path (v. 1.4.5). Com o intuito de determinar possíveis padrões de movimentação do tubarão que possam denotar diferentes modos comportamentais, e.g. residente ou transiente, e considerando o alinhamento predominantemente latitudinal do seu deslocamento, as taxas de movimentação foram calculadas dividindo-se a variação de latitude entre duas geolocalizações consecutivas, pelo número de dias decorridos entre elas ($^\circ\Delta\text{lat}\cdot\text{dia}^{-1}$). Os períodos cujas taxas de movimentação fossem inferiores à média geral de todos os valores foram atribuídos ao modo residente, enquanto que os períodos com taxas de movimentação acima da média foram atribuídos ao modo transiente. Além disso, foram calculadas as velocidades de natação entre cada uma das localizações, as quais foram agrupadas de acordo com o modo de movimentação para a obtenção dos valores médios de velocidade.

Os movimentos verticais foram ainda analisados utilizando GAM. Os modelos compreenderam as variáveis resposta *i*) profundidade de mergulho máxima (PMM), utilizando uma distribuição Gaussiana com função de ligação identidade, e *ii*) tempo na superfície (TNS),

e.g. porcentagem de tempo passada entre a superfície do mar e a isóbata de 5 m, usando uma distribuição binomial com função de ligação logística. As possíveis variáveis explicativas para ambos os modelos corresponderam ao ciclo circadiano (CicloDia), e.g. dia (das 06:00 às 18:00 h) ou noite (das 18:00 às 06:00 h), fase lunar (FaseLun), TSM e modo de movimentação (ModMov), e.g. residente ou transiente. Além disso, uma versão modificada da análise de “Split Moving Window Gradient Analysis” (SMWGA) (CORNELIUS & REYNOLDS, 1991) utilizando 2.000 iterações de tipo bootstrap foi aplicada aos histogramas de TPP e TPT, visando identificar alterações estatisticamente significativas na utilização vertical de profundidade e temperatura. Janelas temporais variando entre 15 e 300 h foram utilizadas para computar dissimilaridades estatisticamente significantes entre as duas metades dos intervalos de dados ao longo de toda a trajetória, as quais foram calculadas com um método randomizado utilizando uma medida de dissimilaridade multivariada Euclidiana, e codificando os resultados obtidos ao longo do processo iterativo como significantes (1) ou não significantes (0). Os resultados binários para cada uma das janelas temporais foram salvos em uma matriz, a qual foi plotada em uma imagem onde os valores 1 (significante) e 0 (não significante) corresponderam às cores preta e branca, respectivamente. Uma vez que a imagem resultante formasse um triângulo invertido, e.g. uma forma triangular preta cujo vértice apontasse para baixo, uma alteração significativa na distribuição vertical do tubarão seria associada ao dia apontado pelo vértice da parte inferior do triângulo. Essa metodologia foi anteriormente utilizada para investigar alterações no comportamento vertical de tubarões, sendo considerada adequada para lidar com as lacunas presentes nos conjuntos de dados obtidos a partir da plataforma ARGOS (QUEIROZ et al., 2010).

3.3. RESULTADOS

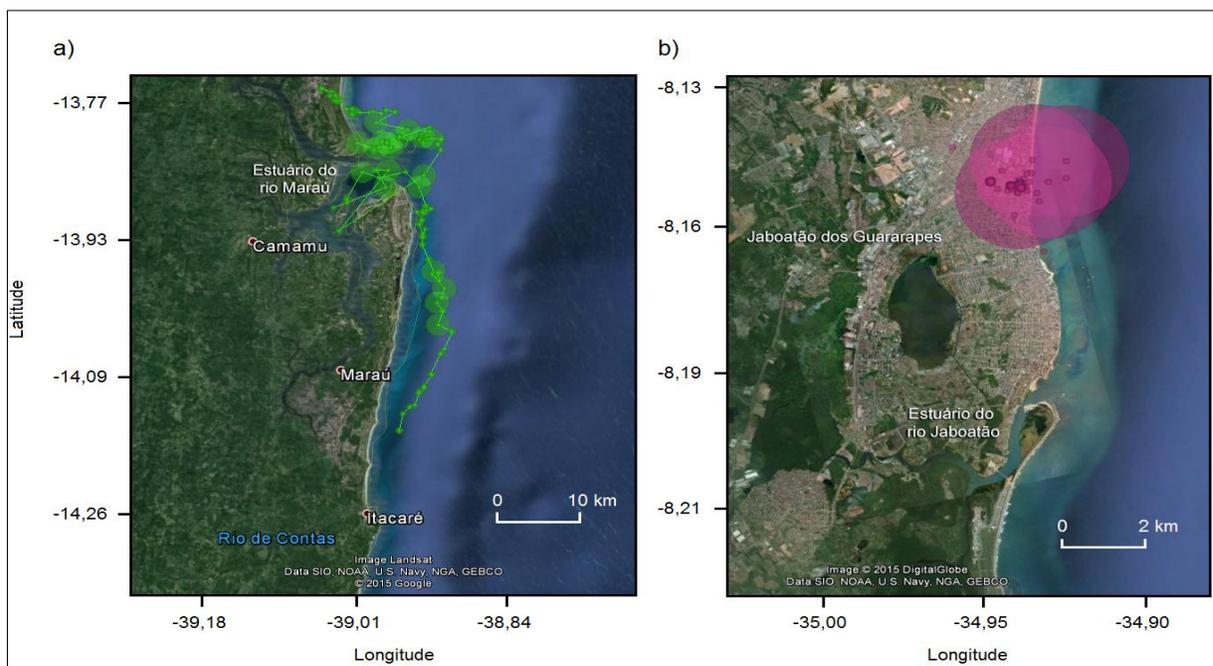
3.3.1. Telemetria acústica

Nenhum dos tubarões marcados foi jamais detectado pelos receptores dispostos ao longo da RMR, indicando que esses animais não retornaram para a área de risco de ocorrência de interações entre tubarões e humanos após serem transportados para longe da costa e liberados.

3.3.2. Pop-up e transmissão dos dados

Ambos os transmissores permaneceram fixados aos respectivos tubarões durante todo o período previamente programado. Após 75 dias de monitoramento em Leu 1, o pop-up do primeiro transmissor ocorreu no dia 1 de outubro de 2012, a aproximadamente 3 km da costa do Estado da Bahia (14,18°S; 38,89°O), em seguida derivando para norte de acordo com a direção da corrente costeira na região (Fig.3.6a). O segundo transmissor se desprendeu de Leu 2 após 120 dias de monitoramento, e o pop-up aconteceu no dia 23 de janeiro de 2015 a cerca de 800 m da costa do Estado de Pernambuco, na cidade de Jaboatão dos Guararapes (8,17°S; 34,90°O), tendo derivado até a praia ainda no mesmo dia (Fig. 3.6b) e sendo encontrado após três dias de buscas na região, a aproximadamente 500 m de distância da praia.

O primeiro transmissor enviou aos satélites ARGOS um total de 760 mensagens incluindo 11 pontos de geolocalização durante um período de 5 dias, tendo decodificado com sucesso 69% das mensagens enviadas pelo transmissor ao final do monitoramento, correspondendo a 50,2% dos dados armazenados durante todo o período. Uma vez que o segundo transmissor foi recuperado, foi possível obter todos os dados armazenados durante os 4 meses de monitoramento numa resolução temporal de 15 segundos.

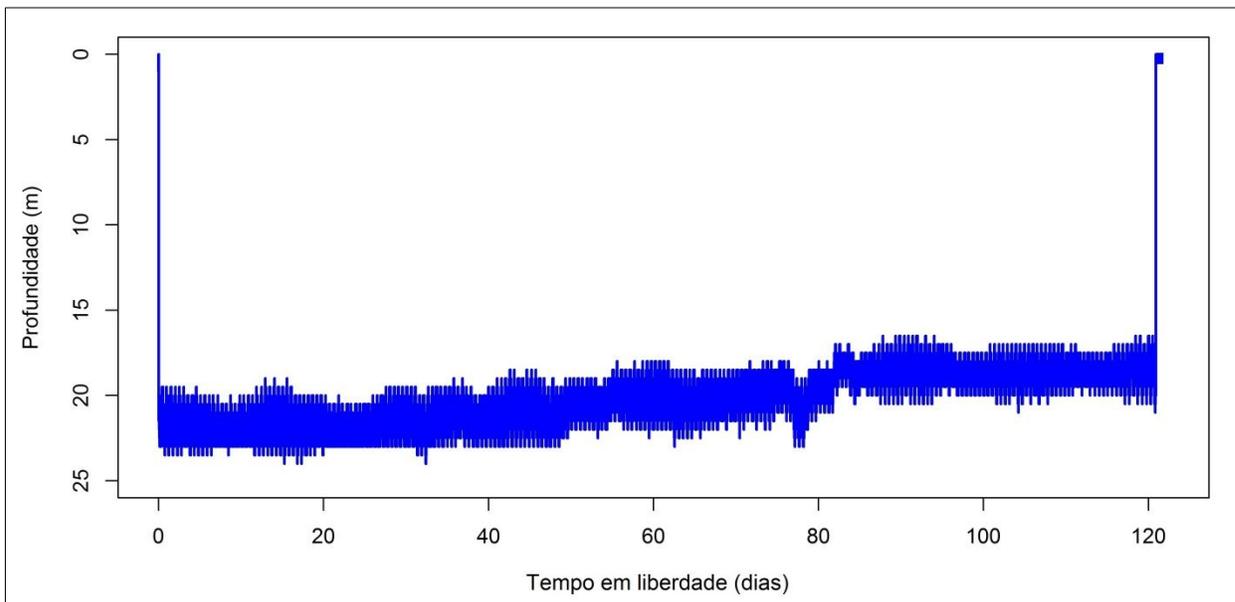


Fonte: Adaptado do Google Earth (2015)

Figura 3.6. Geolocalização dos transmissores após se desprenderem de Leu 1 (a) e Leu 2 (b). As elipses verde e rosa correspondem aos respectivos erros das estimativas de posição.

3.3.3. Movimentação vertical e horizontal

A monótona variação dos dados de profundidade do Leu 2 a cada 15 segundos, indicou que esse tubarão morreu no mesmo dia em que foi liberado, tendo afundado imediatamente até à isóbata de aproximadamente 20 m de profundidade e permanecendo nessa profundidade durante todo o período de monitoramento (Fig. 3.7).



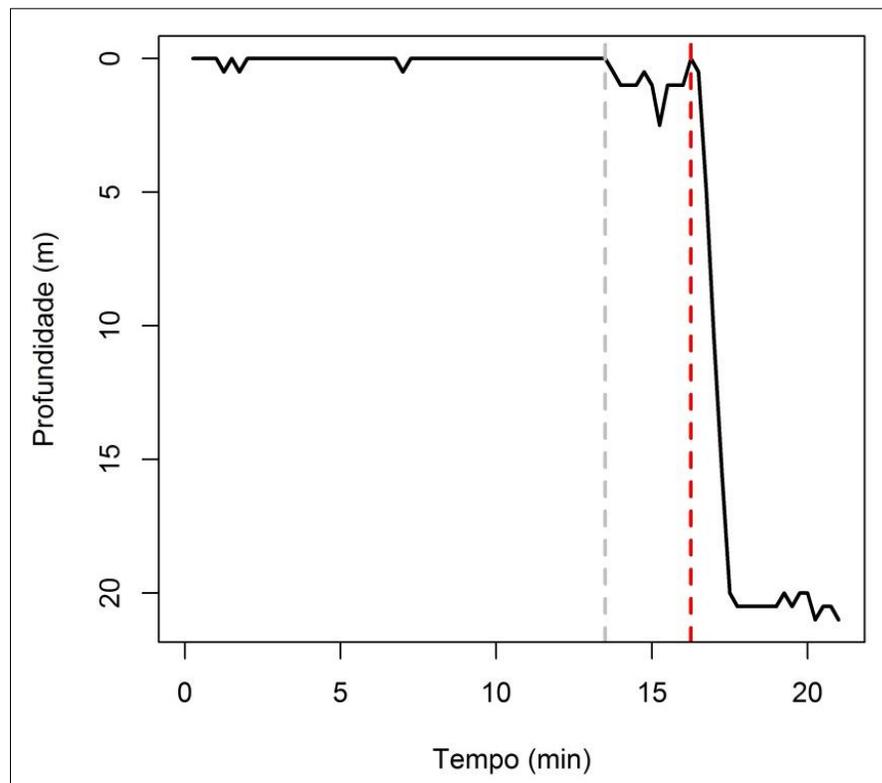
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.7. Variação de profundidade do Leu 2 ao longo dos 120 dias de monitoramento.

A análise dos primeiros 20 minutos dos dados de variação de profundidade a cada 1 segundo mostraram que Leu 2 ainda estava vivo no momento em que foi liberado, tendo nadado apenas por aproximadamente 3 minutos, realizando um pequeno mergulho aos 2,5 m de profundidade e vindo ainda até à superfície do mar, e então se afundando até os 20,5 m a uma velocidade de $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 3.8), tendo o transmissor se soltado a apenas 7,5 km do local onde o tubarão foi liberado.

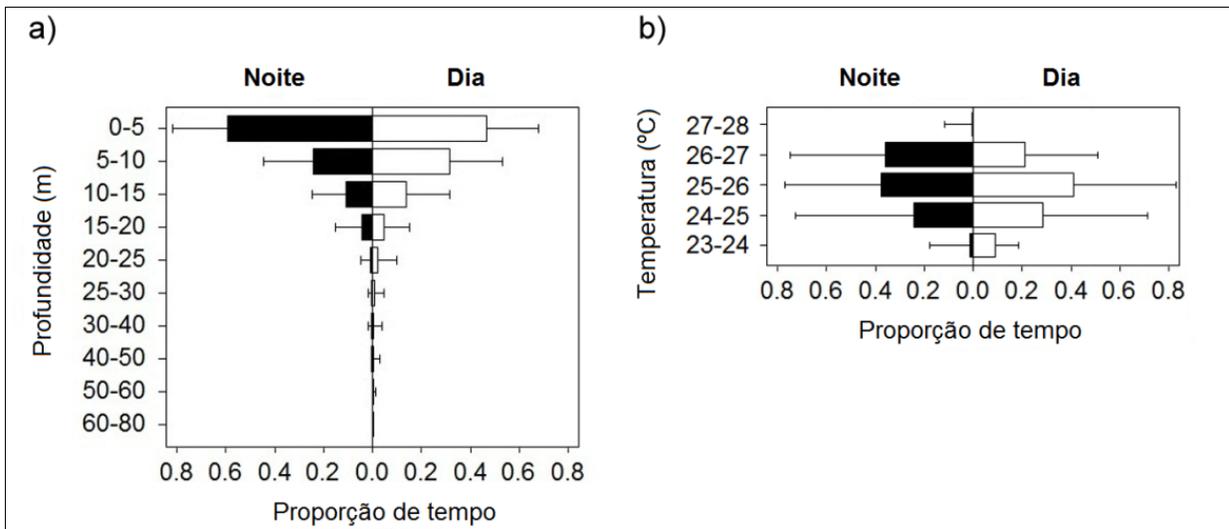
O pop-up do transmissor fixado em Leu 1 ocorreu a aproximadamente 820 km do ponto de liberação, indicando que esse tubarão cabeça-chata se deslocou em sentido sul após ser liberado na costa de Recife, não tendo retornado até à área de estudo uma vez que não foi detectado pelos transmissores acústicos. O tubarão permaneceu 97,4% do tempo entre a superfície do mar e a isóbata de 20 m, fazendo pouco uso de águas com mais de 20 m de

profundidade e utilizando os 5 m superiores da coluna de água durante 52,7% do tempo (Fig. 3.9a). O tubarão atingiu uma profundidade máxima de 64 (± 4) m, sugerindo que ele tenha se movimentado preferencialmente sobre a plataforma continental durante o seu percurso, uma vez que a quebra da plataforma no nordeste brasileiro começa na isóbata dos 60 m (FAINSTEIN & MILLIMAN, 1979). Além disso, o tubarão permaneceu 96,9% do tempo em temperaturas variando entre 25,0°C e 27,6°C (Fig. 3.9b), as quais correspondem à temperatura da camada de mistura superficial nessa região (AFONSO & HAZIN, 2015). Devido a sua distribuição preferencial em águas pouco profundas, esse tubarão esteve exposto a um pequeno gradiente térmico (máximo = 27,6°C; mínimo = 23,6°C).



Fonte: Dados da pesquisa

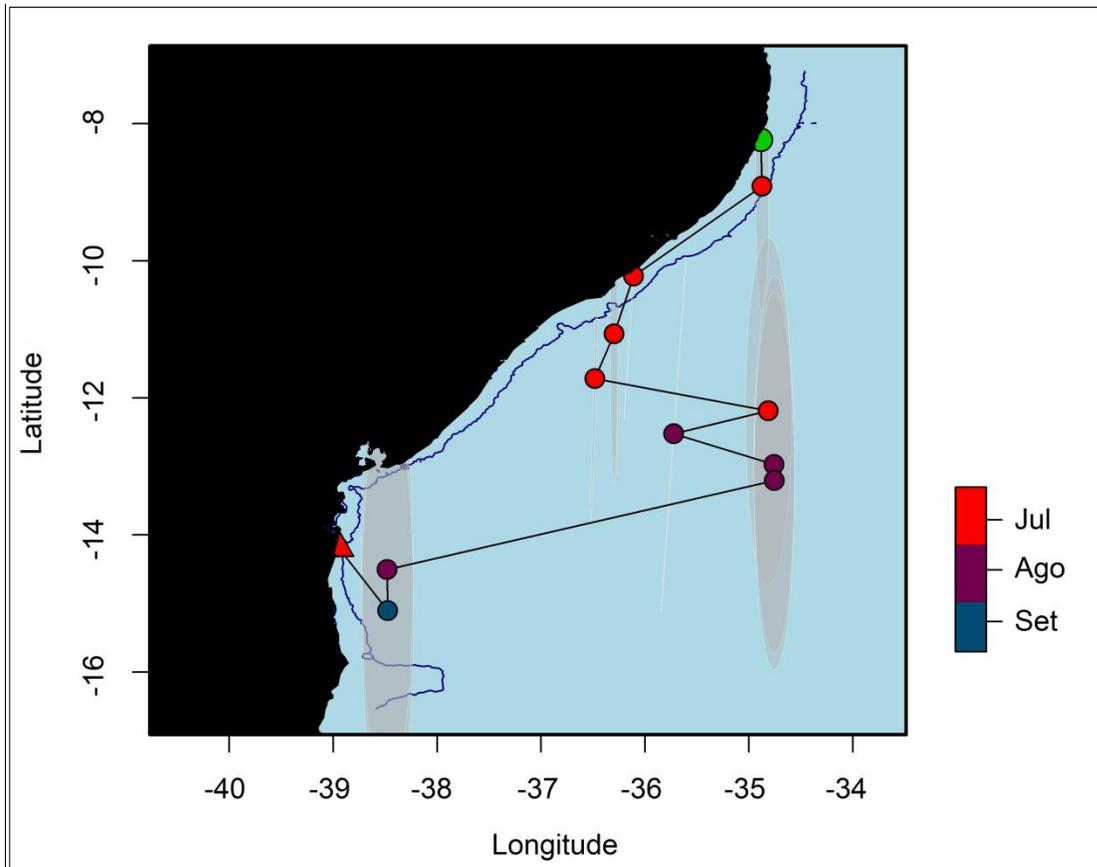
Figura 3.8. Variação de profundidade do Leu 2 durante os primeiros 20 minutos em liberdade. A linha cinza pontilhada representa o provável momento da liberação do tubarão. A linha vermelha pontilhada indica o momento do afundamento do tubarão.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.9. Variação diária na utilização de profundidade (a) e temperatura (b) pelo Leu 1. Proporção de tempo passada em cada um dos estratos de profundidade e temperatura durante a noite (barras pretas) e durante o dia (barras brancas). As linhas de erro representam os desvios padrão.

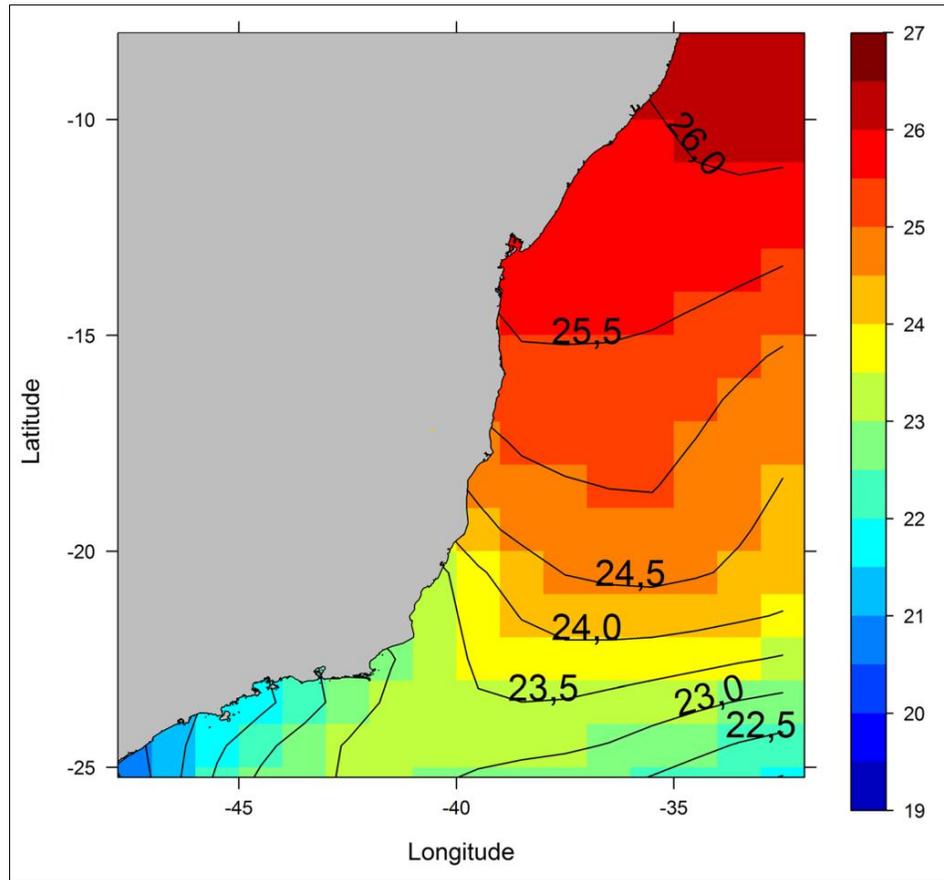
De todos os pontos de localização registrados pelo transmissor fixado em Leu 1, apenas um foi removido das análises pois indicava uma velocidade média de natação biologicamente pouco provável ($1,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Os movimentos horizontais de Leu 1 estimados com o modelo mais simples indicaram uma trajetória relativamente unidirecional em direção sul, compreendendo uma distância total de aproximadamente 1.700 km e sugerindo utilização de habitat oceânico durante parte do percurso (Fig. 3.10). O deslocamento latitudinal mínimo estimado por esse modelo correspondeu a $7,31^\circ$ e a uma posição máxima ao sul em $15,54^\circ\text{S}$ e $39,24^\circ\text{W}$. Por outro lado, as correções de TSM implementadas pelo segundo modelo propuseram uma distância total percorrida muito maior, totalizando 3.676 km. Esse modelo sugeriu que o tubarão teria se deslocado inicialmente em sentido sul, percorrendo uma distância de 2.520 km desde o local da sua liberação até à costa do Estado do Rio de Janeiro ($23,32^\circ\text{S}$; $44,53^\circ\text{W}$) em apenas 38 dias. A partir de então, o tubarão teria percorrido 1.156 km em sentido norte, até o transmissor se desprender na costa do Estado da Bahia. Em comparação com o primeiro modelo, essa trajetória sugere que o tubarão teria percorrido uma enorme distância ao sul da posição em que o transmissor se liberou do tubarão, gerando assim dúvidas sobre a sua acurácia.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.10. Trajetória do tubarão cabeça-chata Leu 1 marcado na costa da RMR, estimada com o modelo do filtro de Kalman sem correção de TSM. O círculo verde e o triângulo laranja representam a liberação do tubarão e a localização do pop-up, respectivamente. Os meses de cada uma das localizações está representado pela escala de cores. As áreas sombreadas representam o erro da estimativa do algoritmo.

Entretanto, os valores de TSM registrados via satélite entre 19 e 26 de agosto de 2012 (Fig. 3.11) corroboraram a movimentação estimada pelo modelo com correção de TSM, uma vez que a temperatura mais fria registrada na superfície do mar ($23,6^{\circ}\text{C}$) pelo transmissor no dia 24 de agosto de 2012, somente poderia ter sido encontrada por volta da latitude 20°S (Fig. 3.12). Além disso, os valores de TSM registrados pelo transmissor foram estatisticamente diferentes dos valores de TSM obtidos por satélite para as localizações estimadas pelo primeiro modelo ($t = -2.569$; $df = 12.442$; $p = 0.023$), enquanto que não houve diferença estatisticamente significativa para as localizações estimadas pelo modelo com correção de TSM ($t = -0.623$; $df = 17.915$; $p = 0.540$).



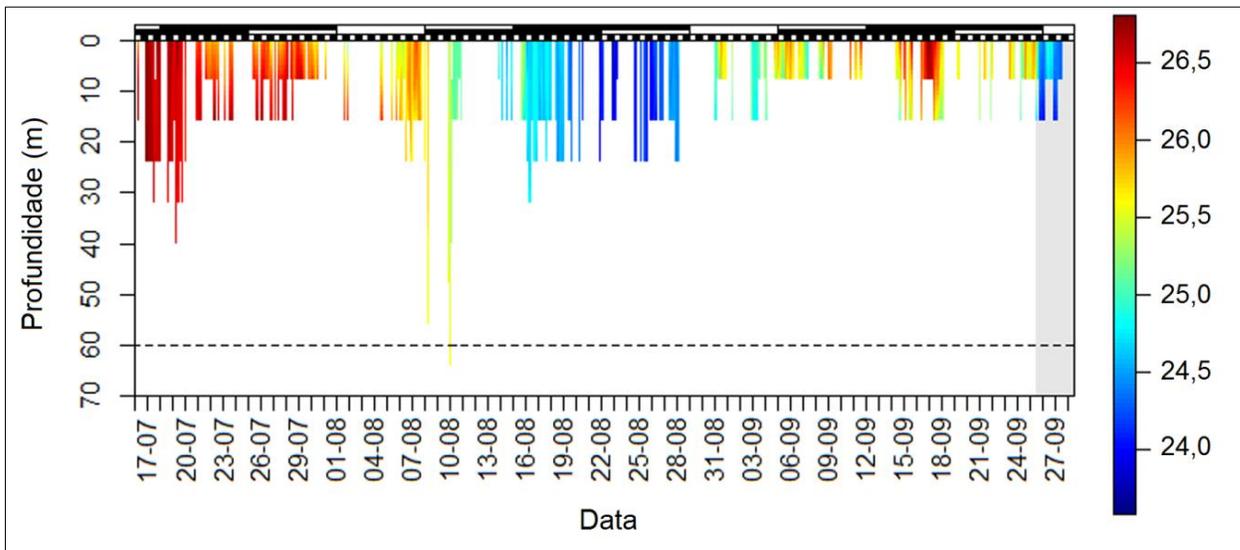
Fonte: Adaptado da NOAA ESRL (2015)

Figura 3.11. Temperatura média da superfície do mar na costa brasileira para o período entre 19 e 26 de agosto de 2012. A escala de cor representa a temperatura em graus Celsius, também representada pelas isolinhas pretas.

Devido ao fato das geolocalizações estimadas pelo modelo com correção de TSM terem sugerido uma extensa utilização de habitat oceânico durante todo o período de monitoramento, foram realizadas correções biológicas em todas as estimativas de posição para composição da TMP dos movimentos do tubarão (Fig. 3.13).

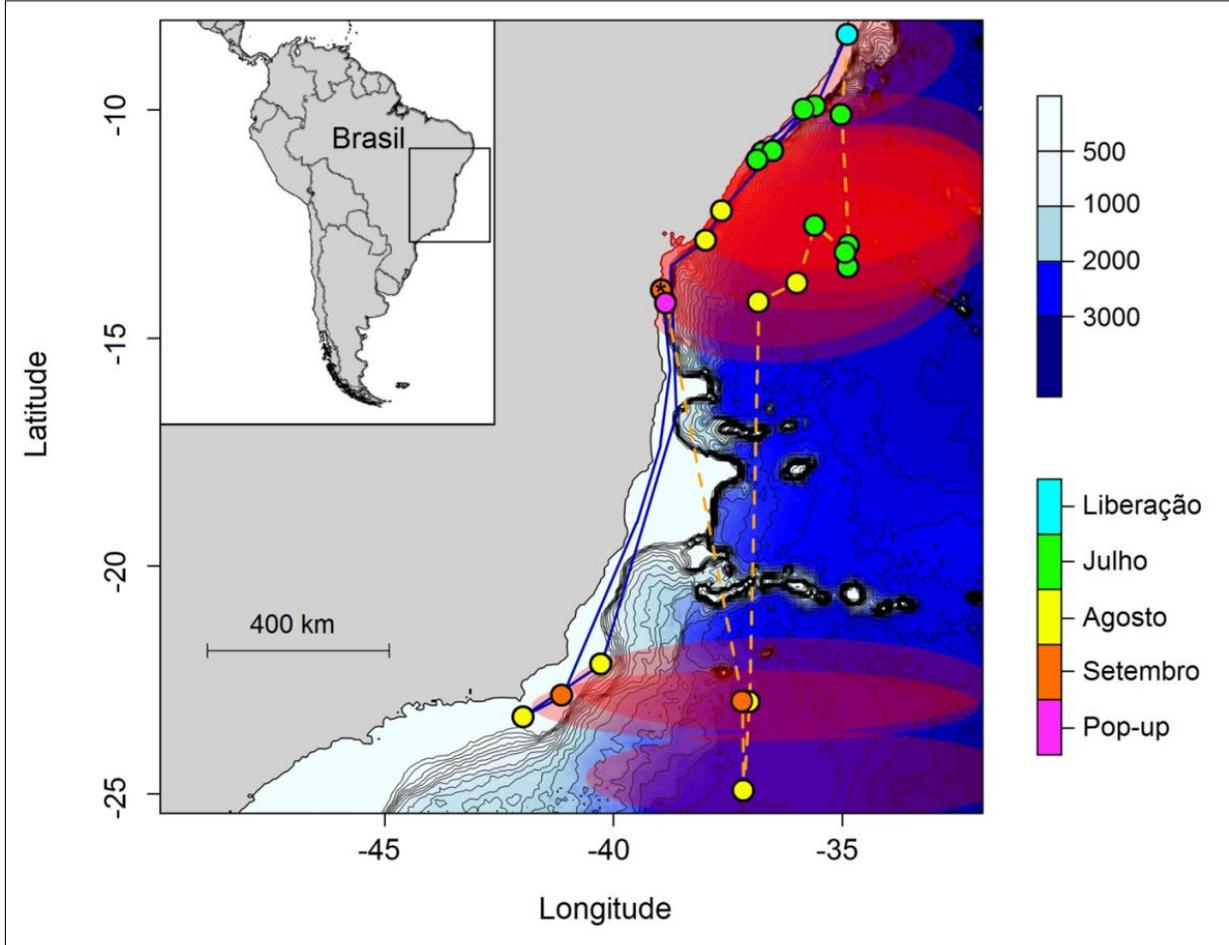
No início do percurso, o tubarão cabeça-chata experimentou uma redução progressiva na TSM de 25,8°C, em 8 de agosto, a um valor mínimo de 23,6°C, registrado em 23 de agosto (taxa de redução média = $0,009^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$; DP = 0,05) (Fig. 3.12). Uma segunda redução na TSM ocorreu com uma taxa muito mais rápida (taxa de redução média = $0,05^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$; DP = 0,07), indo dos 25,8°C, em 25 de setembro, para 24,0°C, em 26 de setembro (Fig. 3.12), e.g. em apenas 18 horas. Esses valores de TSM mais fria foram registrados pelo transmissor até 28 de setembro (Fig.

3.12), correspondendo ao último dia de dados disponível. Durante esse período, o tubarão exibiu uma distribuição em águas bastante rasas, com profundidade máxima de 8 m (± 4 m), cujas temperaturas de fundo se mostraram mais quentes do que as temperaturas na superfície, tendo sido encontradas diferenças estatisticamente significativas ($t = -5,099$; $df = 4$, $p = 0,006$; média das diferenças = $0,52^{\circ}\text{C}$). Todas essas evidências combinadas sugerem fortemente que o tubarão tenha entrado em um ambiente estuarino. Conseqüentemente, dado que o pop-up ocorreu a apenas 30 km ao sul do Estuário do rio Maraú, no sul do Estado da Bahia, e uma vez que ambas as profundidades e temperaturas deste ambiente durante o mês em que o tubarão tenha eventualmente utilizado hábitat estuarino, e.g. setembro de 2012, são compatíveis com os valores registrados pelo transmissor (Santana, 2012), uma nova localização posicionando o tubarão dentro do Estuário do rio Maraú no dia 26 de setembro foi adicionada à TMP (Fig. 3.13).



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.12. Parâmetros de profundidade e temperatura medidos pelo transmissor inserido no tubarão Leu 1. As faixas representativas correspondem ao comportamento de mergulho do tubarão durante o período de monitoramento na costa do Brasil. A escala de cor representa a temperatura da água do mar ($^{\circ}\text{C}$). A linha horizontal pontilhada representa a isóbata dos 60 m da quebra da plataforma continental. O primeiro painel superior representa o ciclo diário, e.g. dia (branco) e noite (preto). O próximo painel superior corresponde ao ciclo lunar, onde os retângulos pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A região sombreada representa o período em que a temperatura de superfície do mar diminuiu bruscamente.

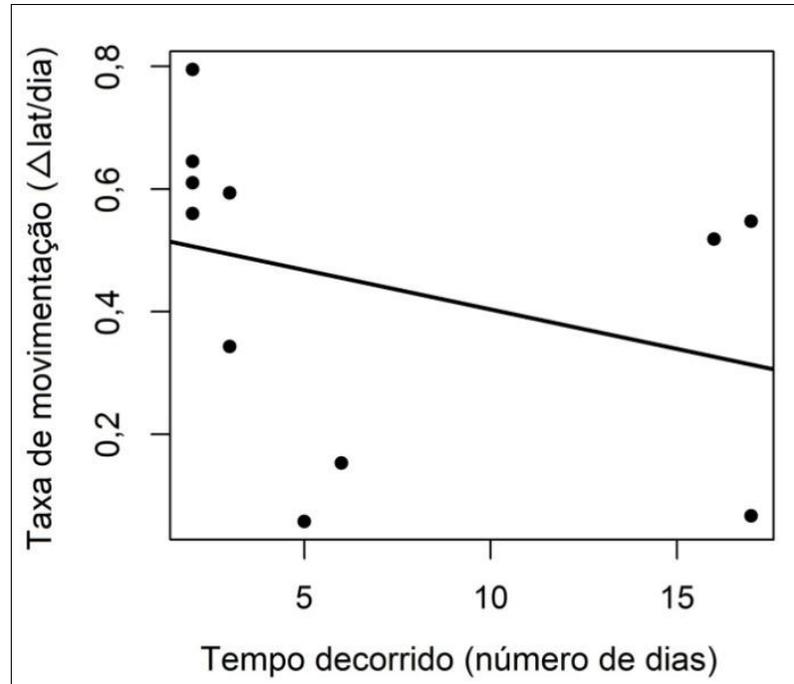


Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.13. Modelo UKFSST final da movimentação do tubarão Leu 1. Os pontos azul e rosa representam as localizações de liberação e pop-up, respectivamente. O perfil batimétrico e os meses correspondentes de cada geolocalização estão representados pelas escalas de cor. As linhas tracejadas laranjas representam o modelo do filtro de Kalman com correção de temperatura da superfície do mar, enquanto que as linhas sólidas azuis representam a trajetória mais provável após as correções de utilização de habitat oceânico. As áreas sombreadas em vermelho representam os intervalos de confiança das posições do modelo. (*) Entrada no estuário do rio Marau em 26 de setembro.

Apenas 13 geolocalizações, separadas por diferentes intervalos de tempo, foram utilizadas para classificar o modo de movimentação do tubarão como transiente ou residente ao longo do monitoramento. Esse método foi considerado adequado uma vez que não houve evidência ($p = 0,312$) das taxas de movimentação terem sido influenciadas pela quantidade de tempo decorrido entre geolocalizações consecutivas (Fig. 3.14), as quais poderiam sugerir um artifício amostral

invés da real taxa de movimentação do tubarão. Um ponto considerado como “outlier” foi removido a partir da análise de validação, devido à taxa de movimentação bastante elevada durante esse período em decorrência do curto intervalo de tempo entre as suas localizações, e.g. 1,3 graus de latitude em apenas um dia. Tal taxa de deslocamento seria responsável por gerar velocidades de natação inverossímeis, uma vez que o movimento máximo do tubarão nesse caso seria da mesma ordem de grandeza do próprio erro de estimativa do modelo. A velocidade de natação média total durante o monitoramento foi de $47,70 \text{ km}\cdot\text{dia}^{-1}$ (DP = 26,24), ou $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,30), que correspondem a $0,26 C_T\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,14). Durante os períodos de transiência, o tubarão se moveu com uma taxa média de $0,65 \text{ }^\circ\Delta\text{lat}\cdot\text{dia}^{-1}$ (DP = 0,26) e velocidade média de $67,17 \text{ km}\cdot\text{dia}^{-1}$ (DP = 7,55) ou $0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,08), correspondendo a $0,37 C_T\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,04). Três períodos de residência foram identificados ao longo da trajetória, com um tempo mínimo de residência variando entre 5 e 17 dias, durante os quais o tubarão se movimentou com a taxa média consideravelmente inferior de $0,08 \text{ }^\circ\Delta\text{lat}\cdot\text{dia}^{-1}$ (DP = 0,04) e velocidade média de $15,49 \text{ km}\cdot\text{dia}^{-1}$ (DP = 8,54) ou $0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,09), correspondendo a $0,08 C_T\cdot\text{s}^{-1}$ (DP = 0,04).



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.14. Regressão linear entre a taxa de movimentação do Leu 1 e o número de dias entre as geolocalizações.

O modelo de TNS selecionou as variáveis TSM, modo de movimentação e ciclo diário para explicar a proporção de tempo passada entre a superfície do mar e a isóbata dos 5 m (Tabelas 3.1-3.2). O tubarão permaneceu uma proporção de tempo significativamente maior em profundidades menores que 5 m durante a noite e enquanto exibiu comportamento residente (Tabela 3.3). Além disso, passou mais tempo nos 5 m superiores da coluna de água quando a TSM variou entre 25,5°C e 26,0°C (Fig. 3.15a), correspondendo ao perfil térmico da região entre o local de liberação e o sul do Estado da Bahia (8,14°S-14,20°S). O modelo de PMM selecionou as variáveis TSM, fase lunar e modo de movimentação como variáveis explicativas (Tabelas 3.4-3.5). As maiores profundidades de mergulho foram observadas durante a lua minguante e quando o tubarão exibiu comportamento transiente (Tabela 3.6). Além disso, o tubarão apresentou uma tendência para mergulhar em maiores profundidades em águas da plataforma continental, e.g. em torno da isóbata dos 30 m, quando a TSM variou entre 24,0°C e 25,0°C (Fig. 3.15b), correspondendo ao perfil térmico da região compreendida entre o sul do Estado da Bahia e o norte do Estado do Espírito Santo (14,20°S-19,25°S).

Tabela 3.1. Processo de seleção das variáveis para o GAM do tempo passado na superfície do mar, com indicação da porcentagem de deviancia explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$.

Modelo	Dev.Exp.	logE	AIC	$\Delta_i(\text{AIC})$	$w_i(\text{AIC})$
Nulo	0,00%	-189,21	287,54	252,49	< 0,0001
ModMov	16,10%	-106,44	99,15	64,10	< 0,0001
CicloDia	4,36%	-184,10	286,42	251,37	< 0,0001
FaseLun	11,90%	-112,93	117,67	82,62	< 0,0001
TSM	11,40%	-105,52	98,61	63,56	< 0,0001
TSM + CicloDia	16,0%	-93,36	87,03	51,98	< 0,0001
TSM + FaseLun	22,0%	-89,16	69,82	34,77	< 0,0001
TSM + ModMov	28,5%	-73,07	47,85	12,80	0,4145
TSM + ModMov + FaseLun **					
TSM + ModMov + CicloDia*	32,2%	-44,12	35,05	0	0,5854

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Modelo Final; (**) Variável descartada devido à falta de suporte estatístico ($p > 0.05$)

Tabela 3.2. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no GAM do tempo passado na superfície do mar. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).

Modelo 1	Modelo 2	gl.res.	var.res.	gl.	var.	p
Nulo		295,00	28,302			
Nulo	TSM	250,00	21,075	45,01	7,227	< 0,001
TSM	TSM + ModMov	248,69	17,007	1,96	4,067	< 0,001
TSM + ModMov	TSM + ModMov + CicloDia	248,39	16,138	0,28	0,869	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 3.3. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no ZIGAM espaço-temporal da ocorrência de tubarões cabeça-chata. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância total (var.) e o valor de p (p).

Modelo	Variável	Coef.est.	Err.pad.	z	gl.efc.	gl.ref.	Chi.qua	p
TSM + ModMov + CicloDia	Intercepto	0,606	0,029	20,49				< 0,001
	TSM*				3,61	4,48	6,54	< 0,001
	(ModMov) transiente	-0,257	0,033	-7,72				< 0,001
	(CicloDia) noite	0,125	0,032	3,91				< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Variável modelada com uma função suavizadora contínua.

Tabela 3.4. Processo de seleção das variáveis para o GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão representadas a porcentagem de deviança explicada pelos modelos (Dev.exp.), e os respectivos valores de logE, AIC, $\Delta_i(\text{AIC})$, e $w_i(\text{AIC})$.

Modelo	Dev.Exp.	logE	AIC	$\Delta_i(\text{AIC})$	$w_i(\text{AIC})$
Nulo	0,0%	-159,09	201,43	36,34	< 0,0001
ModMov	13,2%	-155,16	197,04	31,95	< 0,0001
CicloDia**					
FaseLun	15,4%	-155,68	197,09	32,00	< 0,0001
TSM	17,5%	-137,23	170,44	5,35	0,0358
TSM + FaseLun	31,2%	-134,43	166,39	1,30	0,2715
TSM + ModMov	27,6%	-135,02	167,30	2,21	0,1723
TSM + FaseLun + ModMov*	34,9%	-130,90	165,09	0	0,5202

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Modelo final; (**) Variável descartada devido à falta de suporte estatístico ($p > 0.05$)

Finalmente, a análise de SMWGA indicou duas alterações significativas na distribuição vertical do tubarão cabeça-chata Leu 1 ao longo da sua trajetória. A primeira ocorreu no dia 22 de julho, quando o tubarão começou a utilizar águas mais profundas (Fig. 3.16) e temperaturas mais baixas (Fig. 3.17), enquanto que a segunda alteração, muito mais pronunciada devido ao aspecto mais uniforme do triângulo invertido, ocorreu no dia 29 de agosto, a partir de quando o tubarão mostrou uma preferência por habitats menos profundos (Fig. 3.16) e águas mais quentes (Fig. 3.17).

Tabela 3.5. Sumário das análises de variância utilizando o teste de Chi-quadrado para investigar a significância da inclusão de novas variáveis no GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão representados os respectivos modelos analisados, os graus de liberdade dos resíduos (gl.res.), a variância residual (var.res.), os graus de liberdade totais (gl.), a variância explicada (var.) e o valor de p (p).

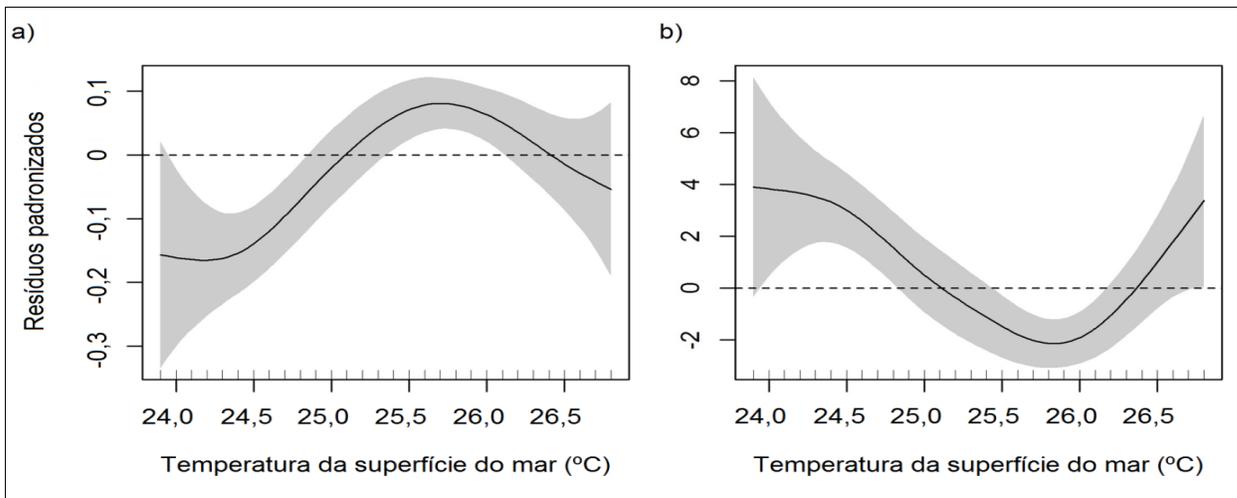
Modelo 1	Modelo 2	gl.res.	var.res.	gl.	var.	P
Nulo		291,08	560146,5			
Nulo	TSM	253,00	13707,5	38,08	546439,00	< 0,001
TSM	TSM + FaseLun	247,12	9500,7	5,88	4206,80	< 0,001
TSM + FaseLun	TSM + FaseLun + ModMov	246,58	8989,8	0,53	510,87	< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa

Tabela 3.6. GAM da profundidade máxima de mergulho. Estão incluídas as variáveis preditivas do modelo (Variável) e seus respectivos valores do coeficiente de estimação (Coef.est.), erro padrão (Err.pad.) e os valores da estatística z (z), para as variáveis categóricas, e os graus de liberdade efetivos (gl.efe.) e de referência (gl.ref.), além dos valores de χ^2 (Chi.qua) para as variáveis contínuas, e dos valores de p (p) correspondentes.

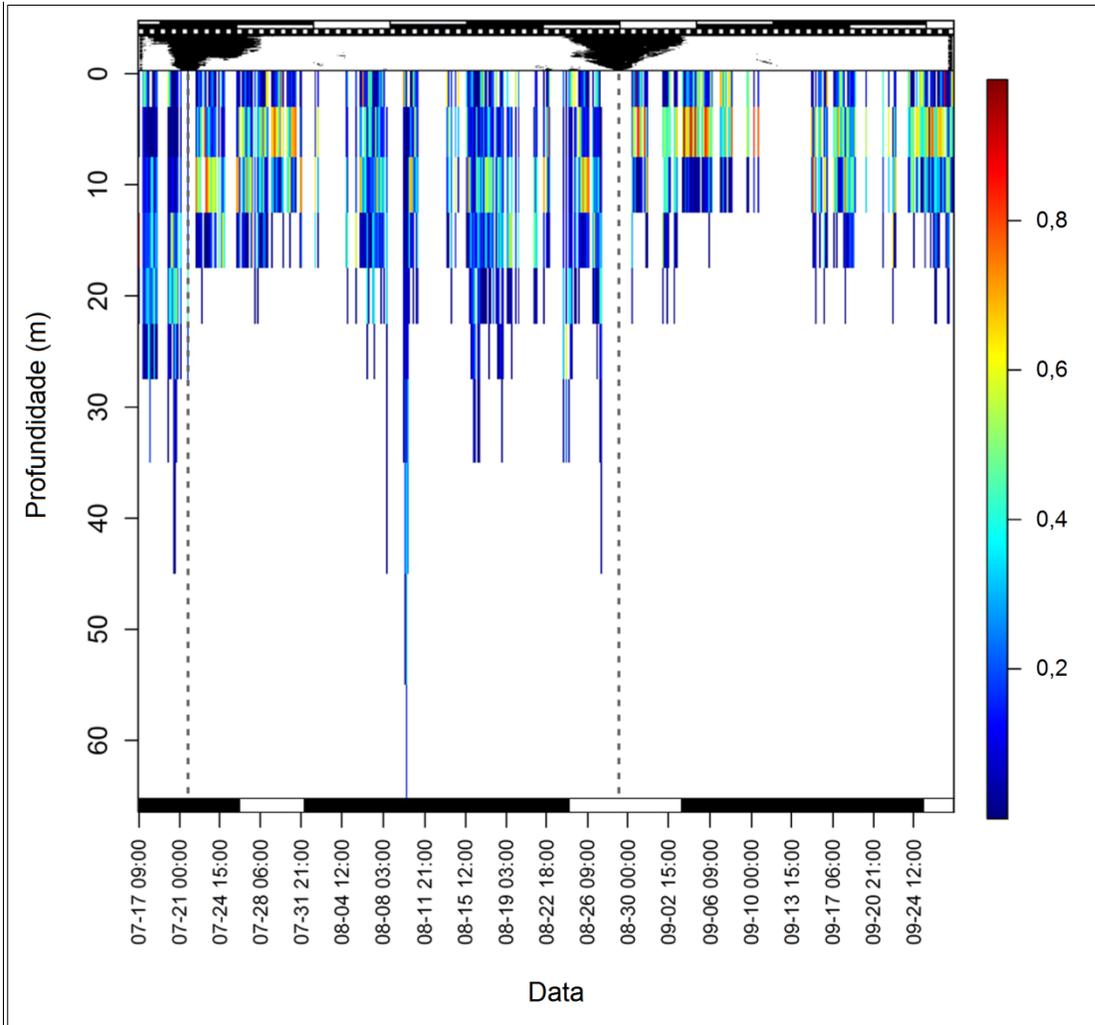
Modelo	Variável	Coef.est.	Err.pad.	z	gl.efe.	gl.ref.	Chi.qua	P
TSM + FaseLun + ModMov	Intercepto	11,962	0,688	17,37				< 0,001
	TSM*				3,42	4,28	6,60	< 0,001
	(FaseLun) cheia	0,157	1,105	0,142				0,887
	(FaseLun) minguate	6,709	1,445	4,640				< 0,001
	(FaseLun) nova	0,217	1,310	0,166				0,868
	(ModMov) transiente	4,095	1,049	3,901				< 0,001

Fonte: Dados da pesquisa; (*) Variável modelada com uma função suavizadora contínua



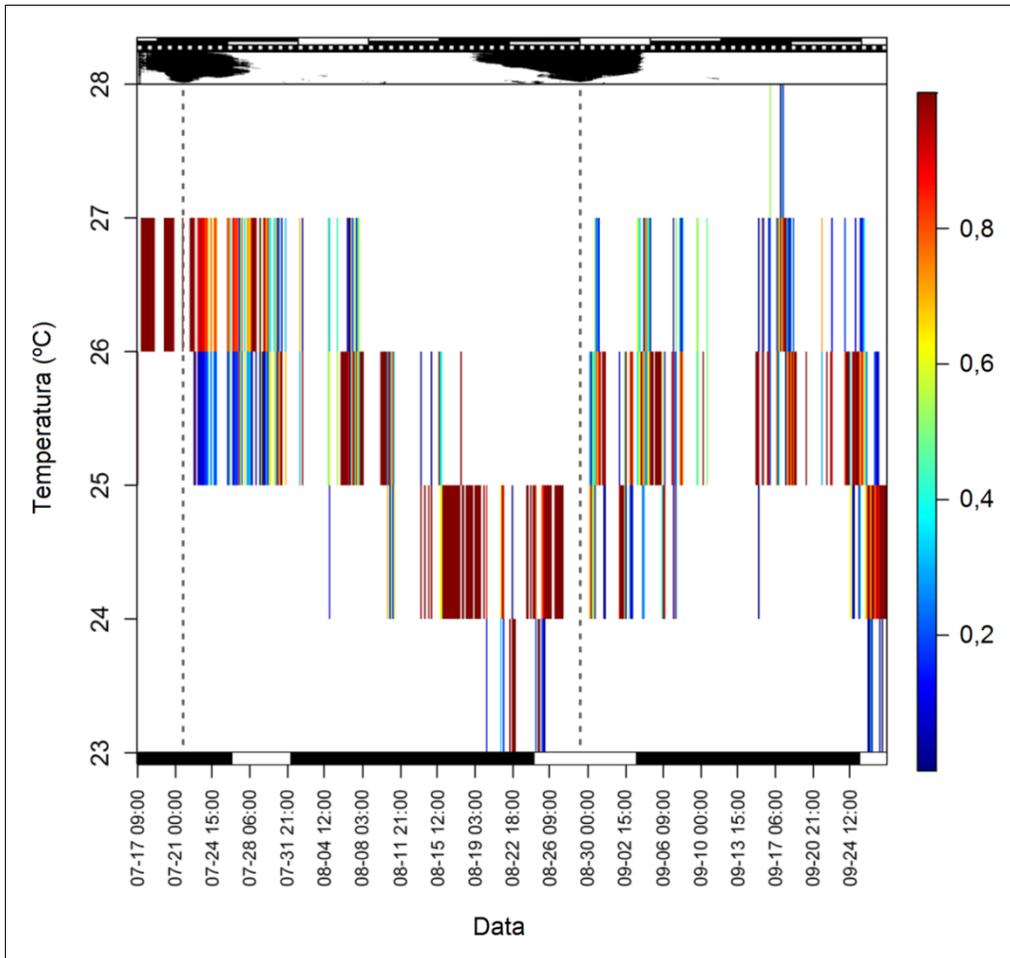
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.15. GAM representando os efeitos de a) tempo na superfície e b) profundidade máxima de mergulho. As linhas horizontais e áreas sombreadas correspondem aos efeitos nulos e a 95% dos intervalos de confiança, respectivamente.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.16. Trajetória representativa de utilização vertical pelo tubarão cabeça-chata durante o monitoramento. A escala de cor informa a proporção de tempo passada em cada estrato de profundidade. Acima da figura, a primeira barra horizontal informa o ciclo lunar, onde os retângulos completamente pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A segunda barra horizontal gradual com pequenas divisões representa o ciclo diário, e.g. dia (quadrados brancos) e noite (quadrados pretos). O painel superior representa o resultado da análise SMWGA. Abaixo da imagem, os retângulos pretos e brancos representam o comportamento transiente e residente, respectivamente.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 3.17. Trajetória representativa de utilização de temperatura pelo tubarão cabeça-chata Leu 1, durante o monitoramento. A escala de cor informa a proporção de tempo passada em cada estrato de temperatura. Acima da figura, a primeira barra horizontal informa o ciclo lunar, onde os retângulos completamente pretos e brancos representam as luas cheia e nova, respectivamente. A segunda barra horizontal gradual com pequenas divisões representa o ciclo diário, e.g. dia (quadrados brancos) e noite (quadrados pretos). O painel superior representa o resultado da análise SMWGA. Abaixo da imagem, os retângulos pretos e brancos representam o comportamento transiente e residente, respectivamente.

3.4. DISCUSSÃO

Os poucos estudos que existem sobre a movimentação e a utilização de hábitat por indivíduos adultos de *C. leucas* têm sugerido uma preferência dessa espécie pela região costeira, revelando ainda que os tubarões cabeça-chata são capazes de realizar migrações sazonais percorrendo distâncias consideravelmente longas (> 400 km), se mostrando menos sedentários do que se acreditava anteriormente (CLIFF & DUDLEY, 1991; DALY et al., 2014), e apresentando uma preferência por determinadas regiões específicas (CARLSON et al., 2010). Confirmando essa tendência, os dados de TSM coletados pelo transmissor ao longo da trajetória do tubarão cabeça-chata monitorado pelo presente estudo sugeriram fortemente que esse tubarão tenha percorrido uma longa distância ao longo da costa brasileira, se movendo inicialmente em sentido sul, até o Estado do Rio de Janeiro, e em seguida retornando em sentido norte, até o Estado da Bahia. Esse tubarão teria percorrido uma grande distância em apenas 75 dias, semelhante às distâncias anuais percorridas por tubarões cabeça-chata adultos no Oceano Índico estimadas por telemetria acústica (DALY et al., 2014). Conseqüentemente, a não realização das correções de geolocalização baseadas nos dados de TSM sobre as posições estimadas com o filtro de Kalman, teriam resultado em uma subestimação substancial da distância total percorrida por esse tubarão cabeça-chata.

Apesar do pouco tempo necessário para realizar um movimento dessa magnitude, a velocidade média de natação desse tubarão cabeça-chata foi compatível com as velocidades de natação de outros carcharhinídeos de tamanhos similares, e.g. uma velocidade máxima de $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para um tubarão azul, *Prionace glauca*, de 150 cm C_T (KLIMLEY et al., 2002); velocidades médias de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para tubarões limão, *Negaprion brevirostris*, medindo entre 150 e 260 cm C_T , e $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para tubarões cinzento-de-recife, *Carcharhinus amblyrhynchos*, medindo entre 130 e 200 cm C_T (SUNDSTRÖM et al., 2001). Além disso, a sua velocidade média de natação, quando exibindo comportamento transiente ($0,77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) foi similar aos valores de outros tubarões cabeça-chata adultos monitorados, e.g. velocidade máxima de aproximadamente $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DALY et al., 2014) e $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (LEA et al., 2015). Conseqüentemente, a movimentação estimada pelo presente trabalho pode ser considerada como biologicamente plausível, apesar de ter sido substancialmente rápida e ter se processado ao longo de uma distância total extensa.

As taxas de movimentação consideravelmente menores, observadas quando o tubarão apresentou comportamento residente, também foram compatíveis com aquelas evidenciadas por

tubarões cabeça-chata demonstrando comportamento residente no Atlântico Norte, e.g. velocidade máxima de $27 \text{ km}\cdot\text{dia}^{-1}$ (CARLSON et al., 2010). Os padrões de movimentação descritos nesse estudo sugerem que os tubarões cabeça-chata apresentam uma utilização individual de grandes habitats na costa brasileira, exibindo dois modos principais de movimentação, e.g. transiente ou residente. Tal padrão de movimentação pode ser parcialmente relacionado com o comportamento Lévy (SHLESINGER; ZASLAVSKY; KLAFTER; 1993), uma vez que o tubarão poderia ter alternado entre os tipos de comportamento com menores (e.g. Lévy walks) e maiores (e.g. Lévy flights) taxas de movimentação, presumivelmente como uma estratégia para otimizar o sucesso de forrageamento (SIMS et al., 2008). De fato, o comportamento residente de tubarões cabeça-chata esteve correlacionado com a atividade de forrageamento em áreas altamente produtivas (CARLSON et al., 2010). Fenômenos de ressurgência costeira constituem um importante processo oceanográfico, responsável por aumentar a produtividade primária nas costas oeste da América do Sul, África e América do Norte (CARBONEL & VALENTIN, 1999). No Brasil, uma ressurgência costeira incomum que ocorre na região de Cabo Frio ($23,00^{\circ}\text{S}$; $41,85^{\circ}\text{W}$), na costa do Estado do Rio de Janeiro (MASCARENHAS; MIRANDA; ROCK; 1971), é responsável por promover afloramentos de fitoplâncton principalmente entre os meses de outubro e fevereiro (VALENTIN, 1984; VALENTIN; LINS DA SILVA; BASTOS; 1985). Apesar do maior período de residência (mínimo de 17 dias), desse tubarão ter ocorrido em uma região influenciada pelo sistema de ressurgência de Cabo Frio, este ocorreu quando o fenômeno geralmente está mais fraco.

Ainda que esse tubarão tenha demonstrado uma clara preferência por águas com profundidades inferiores a 20 m, de maneira similar ao evidenciado por indivíduos dessa mesma espécie no hemisfério norte (CARLSON et al., 2010), maiores proporções de tempo passadas em águas com menos de 5 m de profundidade, enquanto em modo residente, podem ser um indicativo de atividade de forrageamento em águas ainda mais rasas e próximas da costa. Uma maior utilização de águas mais rasas que 5 m foi observada também durante o período noturno, o que pode estar associado à atividade predatória, uma vez que os carcharhinídeos são geralmente mais ativos durante a noite (RANDALL, 1967), e os tubarões cabeça-chata mostraram um aumento da atividade de alimentação durante esse período (DRIGGERS et al., 2012).

O tubarão marcado mostrou uma preferência por profundidades um pouco maiores da plataforma continental enquanto exibiu comportamento transiente, de maneira semelhante ao

padrão observado para um macho adulto de *C. leucas* se movimentando na costa sudeste dos Estados Unidos (CARLSON et al., 2010). Além disso, a utilização de isóbatas mais profundas enquanto se movendo na costa sudeste do Brasil pode provavelmente ser explicada pela morfologia consideravelmente mais larga (90-210 km) e maiores profundidades da quebra (150-185 m) da plataforma continental brasileira nesta região (MARTINS & COUTINHO, 1981). Apesar da amplamente conhecida preferência dessa espécie por habitats costeiros, um tubarão cabeça-chata adulto foi encontrado anteriormente no arquipélago dos Açores, no Atlântico Leste (GADIG; JULIANO; BARREIROS; 2006). Além disso, uma fêmea grávida recentemente monitorada no Oceano Índico Oeste percorreu uma distância de 10.670 km durante um período de 151 dias, indo de Seychelles a Madagascar, onde aparentemente deu à luz os seus filhotes antes de retornar a Seychelles. Esse foi o primeiro *C. leucas* marcado com um transmissor satélite a ter se movido em região oceânica, tendo exibido um comportamento de mergulho mais profundo e utilizando frequentemente profundidades em torno de 160 m enquanto migrava entre essas duas regiões insulares (LEA et al., 2015). Apesar da necessidade de uma melhor compreensão a respeito da eventual utilização de habitats oceânicos por tubarões cabeça-chata, o comportamento vertical descrito por Lea et al. (2015) sustenta fortemente a proposição de que a movimentação do tubarão descrita pelo presente estudo tenha ocorrido preferencialmente ao longo da plataforma continental brasileira, onde profundidades maiores que 60 m são geralmente indisponíveis. Portanto, o fato desse tubarão ter passado 97% do período em profundidades < 20 m, sugere que a correção biológica aplicada à trajetória mais provável tenha melhorado significativamente a precisão da movimentação estimada.

Foi observada uma redução brusca na TSM durante os últimos dias do período de monitoramento, com as temperaturas mais quentes tendo sido registradas no fundo em comparação com a superfície, um padrão típico de cunha salina em ambientes estuarinos estratificados, onde uma haloclina separa a água doce na camada superficial e a água marinha em uma camada mais profunda (NEWTON, 1996). A proximidade da localização entre o pop-off e o estuário do rio Maraú sugere que o tubarão possa ter tido acesso a esse estuário em particular por um período mínimo de 3 dias, uma vez que os dados de temperatura para o período entre 28 de setembro e 1 de outubro não estiveram disponíveis. Durante o mês de setembro, o estuário do rio Maraú exibe temperaturas similares às que foram registradas pelo transmissor (em torno de 24°C), e uma profundidade máxima de 11 m (SANTANA, 2012), de forma que ambos os perfis

batimétricos e térmicos desse estuário são compatíveis com os dados coletados pelo transmissor durante o período referido. A dinâmica de utilização estuarina por *C. leucas* adultos pode estar relacionada com o comportamento de forrageamento, de modo que esses tubarões geralmente predam sobre pequenos peixes no interior de ambientes estuarinos e sobre presas maiores nas áreas marinhas adjacentes (WERRY et al., 2011). O uso contínuo de habitats costeiros por *C. leucas* ao longo do seu ciclo de vida, aumenta a exposição da espécie aos impactos potencialmente prejudiciais derivados da interferência antrópica sobre essas regiões (KARL et al., 2011; WERRY et al., 2012).

3.5. CONCLUSÃO

A grande distância (> 3.500 km) percorrida pelo tubarão cabeça-chata adulto descrita neste estudo, além de reforçar a teoria de que esses animais não são tão sedentários como se acreditava anteriormente, sugere que os tubarões *C. leucas* apresentam utilizações individuais de grandes habitats na costa brasileira. Este estudo não somente descreve os padrões de movimentação do primeiro *C. leucas* marcado com um transmissor satélite no Oceano Atlântico Sul, mas também reporta a maior distância percorrida por um tubarão cabeça-chata macho adulto. Essa longa migração realizada entre as regiões nordeste e sudeste do Brasil, confirma a capacidade dos tubarões cabeça-chata de percorrerem longas distâncias pela província nerítica, apesar de aparentemente exibirem fidelidade a algumas regiões específicas. Entretanto, pesquisas futuras envolvendo um maior número de indivíduos marcados são necessárias para que seja possível um melhor entendimento sobre a utilização de habitat por tubarões cabeça-chata na costa do Brasil.

REFERÊNCIAS

AFONSO, A. S. & HAZIN, F. H. V. Post release survival and behavior and exposure to fisheries in juvenile tiger sharks, *Galeocerdo cuvier*, from the South Atlantic. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 454, p. 55-62, 2014.

AFONSO, A. S. & HAZIN, F. H. V. Vertical movement patterns and ontogenetic niche expansion in the tiger shark, *Galeocerdo cuvier*. **PLOS ONE**, 2015. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0116720>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

ANDERSON, S. D. & GOLDMAN, K. J. Photographic evidence of white shark movements in California waters. **California Fish and Game**, v. 82, n. 4, p. 182-186, 1996.

BANSEMER, C. S. & BENNETT, M. B. Sex- and maturity based differences in movement and migration patterns of grey nurse shark, *Carcharias taurus*, along the eastern coast of Australia. **Marine and Freshwater Research**, v. 62, n. 6, p. 596-606, 2011.

BRUNNSCHWEILER, J. M., QUEIROZ, N. & SIMS, D. W. Oceans apart? Short-term movements and behaviour of adult bull sharks *Carcharhinus leucas* in Atlantic and Pacific Oceans determined from pop-up satellite archival tagging. **Journal of Fish Biology**, v. 77, n. 6, p. 1343-1358, 2010.

CARBONEL, C. A. A. H. & VALENTIN, J. L. Numerical modeling of phytoplankton bloom in the upwelling ecosystem of Cabo Frio (Brazil). **Ecological Modeling**, v. 116, n. 2, p. 135-148, 1999.

CARLSON, J. K., RIBERA, M. M., CONRATH, C. L., HEUPEL, M. R. & BURGESS, G. H. Habitat use and movement patterns of bull sharks *Carcharhinus leucas* determined using pop-up satellite archival tags. **Journal of Fish Biology**, v. 77, n. 3, p. 661-675, 2010.

CLIFF, G. & DUDLEY, S. F. J. Sharks caught in the protective nets off Natal, South Africa. 4. The bull shark *Carcharhinus leucas* Valenciennes. **South African Journal of Marine Science**, v. 10, n. 1, p. 253-270, 1991.

CORNELIUS, J. M. & REYNOLDS, J. F. On determining the statistical significance of discontinuities within ordered ecological data. **Ecology**, v. 72, n. 6, p. 2057-2070, 1991.

DALY, R., FRONEMAN, P. W. & SMALE, M. J. Comparative feeding ecology of bull sharks (*Carcharhinus leucas*) in the coastal waters of the southwestern Indian Ocean inferred from stable isotope analysis. **PLOS ONE**, 2013. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0078229>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

DALY, R., SMALE, M. J., COWLEY, P. D. & FRONEMAN, P. W. Residency patterns and migration dynamics of adult bull sharks (*Carcharhinus leucas*) on the east coast of South Africa. **PLOS ONE**, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0109357>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

DRIGGERS, W. B., CAMPBELL, M. D., HOFFMAYER, E. R. & INGRAM JR, G. W. Feeding chronology of six species of carcharhinid sharks in the western North Atlantic Ocean as inferred from longline capture data. **Marine Ecology Progress Series**, v. 465, p. 185-192, 2012.

DRYMON, J. M., AJEMIAN, M. J. & POWERS, S. P. Distribution and Dynamic Habitat Use of Young Bull Sharks *Carcharhinus leucas* in a Highly Stratified Northern Gulf of Mexico Estuary. **PLOS ONE**, 2014. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0097124>>. Acesso em: 09 fev. 2015.

- FAINSTEIN, R. & MILLIMAN, J. D. Structure and origin of three continental margin plateaus, northeastern Brazil. **AAPG Bulletin**, v. 63, n. 2, p. 218-238, 1979.
- FERREIRA, L. C., AFONSO, A. S., CASTILHO, P. C. & HAZIN, F. H. V. Habitat use of the nurse shark, *Ginglymostoma cirratum*, off Recife, Northeast Brazil: a combined survey with longline and acoustic telemetry. **Environmental Biology of Fishes**, v. 96, p. 735-745, 2013.
- GADIG, O. B. F., JULIANO, M. F. & BARREIROS, J. P. Further notes on the capture of a *Carcharhinus leucas* in a northeastern Atlantic oceanic insular shelf, the Azores Archipelago, Portugal. **Cybium**, v. 30, n. 4, p. 31-33, 2006.
- GILL, T. & BRANSFORD, J. F. Synopsis of the fishes of Lake Nicaragua. **Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia**, v. 29, p. 175-191, 1877.
- GRUBER, S. H., NELSON, D. R. & MORRISSEY, J. F. Patterns of activity and space utilization of lemon sharks, *Negaprion brevirostris*, in a shallow Bahamian lagoon. **Bulletin of Marine Science**, v. 43, n. 1, p. 61-76, 1988.
- HAMMERSCHLAG, N., GALLAGHER, A. J. & LAZARRE, D. M. A review of shark satellite tagging studies. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 398, n. 1, p. 1-8, 2010.
- HEITHAUS, M. R., DELIUS, B. K., WIRSING, A. J. & DUNPHY-DALY, M. M. Physical factors influencing the distribution of a top predator in a subtropical oligotrophic estuary. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 2, p. 472-482, 2009.
- HEUPEL, M. R., CARLSON, J. K. & SIMPFENDORFER, C. A. Shark nursery areas: concepts, definition, characterization and assumptions. **Marine Ecology Progress Series**, v. 337, p. 287-297, 2007.
- HEUPEL, M. R. & SIMPFENDORFER, C. A. Movement and distribution of young bull sharks *Carcharhinus leucas* in a variable estuarine environment. **Aquatic Biology**, v. 1, p. 277-289, 2008.
- HEUPEL, M. R.; YEISER; B. G.; COLLINS, A. B.; ORTEGA, L. & SIMPFENDORFER, C. A. Long-term presence and movement patterns of juvenile bull sharks, *Carcharhinus leucas*, in an estuarine river system. **Marine and Freshwater Research**, v. 61, n. 1, p. 1-10, 2010.
- HOLLAND, K. N., WETHERBEE, B. M., LOWE, C. G. & MEYER, C. G. Movements of tiger sharks (*Galeocerdo cuvier*) in coastal Hawaiian waters. **Marine Biology**, v. 134, n. 4, p. 665-673, 1999.
- HUETER, R. E., HEUPEL, M. R., HEIST, E. J. & KEENEY, D. B. Evidence of philopatry in sharks and implications for the management of shark fisheries. **Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science**, v. 35, p. 239-247, 2005.

- KARL, S. A., CASTRO, A. L. F., LOPEZ, J. A., CHARVET, P. & BURGESS, G. H. Phylogeography and conservation of the bull shark (*Carcharhinus leucas*) inferred from mitochondrial and microsatellite DNA. **Conservation Genetics**, v. 12, n. 2, p. 371-382, 2011.
- KOCK, A., O'RIAIN, M. J., MAUFF, K., MEYER, M., KOTZE, D. & GRIFFITHS, C. Residency, habitat use and sexual segregation of white sharks, *Carcharodon carcharias*, in False Bay, South Africa. **PLOS ONE**, 2013. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0055048>>. Acesso em: 10 dez. 2014.
- KOHLER, N. E. & TURNER, P. A. Shark tagging: a review of conventional methods and studies. In: TRICAS, T. C. & GRUBER, S. H (Org.). **The behavior and sensory biology of elasmobranch fishes: an anthology in memory of Donald Richard Nelson**. Springer Netherlands, 2001. p. 191-224. 20 v.
- KLIMLEY, A. P., BEAVERS, S. C., CURTIS, T. H. & JORGENSEN, S. J. Movements and swimming behavior of three species of sharks in La Jolla Canyon, California. **Environmental Biology of Fishes**, v. 63, n. 2, p. 117-135, 2002.
- LEA, J. S., HUMPHRIES, N. E., CLARKE, C. R. & SIMS, D. W. To Madagascar and back: long-distance, return migration across open ocean by a pregnant female bull shark *Carcharhinus leucas*. **Journal of Fish Biology**, doi: 10.1111/jfb.12805, 2015.
- LOWE, C. G., HOLLAND, K. N. & WOLCOTT, T. G. A new acoustic tail beat transmitter for fishes. **Fisheries Research**, v. 36, n. 2, p. 275-283, 1998.
- MARTINS, L. R. & COUTINHO, P. N. The Brazilian Continental Margin. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1, p. 87-107, 1981.
- MASCARENHAS, A. S., MIRANDA, L. B. & ROCK, N. J. A study of oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. In: COSTLOW, J. D. **Fertility of the Sea**. New York: Gordon and Breach Science Pub, 1971. p. 285-308.
- MCCORD, M. E. & LAMBERTH, S. J. Catching and tracking the world's largest Zambezi (bull) shark *Carcharhinus leucas* in the Breede Estuary, South Africa: the first 43 hours. **African Journal of Marine Science**, v. 31, n. 1, p. 107-111, 2009.
- NELSON, D. R. On the field study of shark behavior. **American Zoologist**, v. 17, n. 2, p. 501-507, 1977.
- NEWTON, G. M. Estuarine ichthyoplankton ecology in relation to hydrology and zooplankton dynamics in a salt-wedge estuary. **Marine and Freshwater Research**, v. 47, n. 2, p. 99-111, 1996.
- NIELSEN, A., SIBERT, J. R., ANCHETTA, J., GALUARDI, B. & LAM, C. H. Uksfst: Kalman Filter tracking including Sea Surface Temperature. **Pacote do R**, 2012.

ORTEGA, L. A., HEUPEL, M. R., BEYNEN, P. V. & MOTTA, P. J. Movement patterns and water quality preferences of juvenile bull sharks (*Carcharhinus leucas*) in a Florida estuary. **Environmental Biology of Fishes**, v. 84, n. 4, p. 361-373, 2009.

QUEIROZ, N., HUMPHRIES, N. E., NOBLE, L. R., SANTOS, A. M. & SIMS, D. W. Short-term movements and diving behaviour of satellite-tracked blue shark *Prionace glauca* in the northeastern Atlantic Ocean. **Marine Ecology Progress Series**, v. 406, p. 265-279, 2010.

RANDALL, J. E. Food habits of reef fishes of the West Indies. **Institute of Marine Sciences**, University of Miami, 1967. p. 665-673.

SANTANA, R. M. C. **Composição e biomassa da comunidade fitoplanctônica no estuário do rio Maraú – Baía de Camamu (BA)**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, Brasil.

SCARIOTTA, T. C. & NELSON, D. R. Diel behaviour of the blue shark, *Prionace glauca*, near Santa Catalina Island. Calif. **Fisheries Bulletin**, v. 75, p. 519-528, 1977.

SHLESINGER, M. F., ZASLAVSKY, G. M. & KLAFTER, J. Strange kinetics. **Nature**, v. 363, n. 6424, p. 31-37, 1993.

SIBERT, J. R., NIELSEN, A., ANCHETA, J. GALUARDI, B. & LAM, C. H. Kftrack. **Pacote do R**, 2012.

SIMPFENDORFER, C. A. & MILWARD, N. E. Utilization of a tropical bay as a nursery area by sharks of the families Carcharhinidae and Sphyrnidae. **Environmental Biology of Fishes**, v. 37, n. 4, p. 337-345, 1993.

SIMS, D. W., SOUTHALL, E. J., HUMPHRIES, N. E., HAYS, G. C., BRADSHAW, C. J. A., PITCHFORD, J. W., JAMES, A., AHMED, M. Z., BRIERLEY, A. S., HINDELL, M. A., MORRITT, D., MUSYL, M. K., RIGHTON, D., SHEPARD, E. L. C., WEARMOUTH, V. J., WILSON, R. P., WITT, M. J. & METCALFE, J. D. Scaling laws of marine predator search behavior. **Nature**, v. 451, n. 7182, p. 1098-1102, 2008.

SUNDSTRÖM, L. F., STERK, J. & GRUBER, S. H. Effects of a speed-sensing transmitter on the swimming speed of lemon sharks. **Bahamas Journal of Science**, v. 6, n. 1, p. 12-22, 1998.

SUNDSTRÖM, L. F., GRUBER, S. H., CLERMONT, S. M., CORREIA, J. P. S., DE MARIGNAC, J. R. C., MORRISSEY, J. F., LOWRANCE, C. R., THOMASSEN, L. & OLIVEIRA, M. T. Review of elasmobranch behavioral studies using ultrasonic telemetry with special Reference to the lemon shark, *Negaprion brevirostris*, around Bimini Islands, Bahamas. **Environmental Biology of Fishes**, v. 60, n. 3, p. 225-250, 2001.

THORSON, T. B. Movement of bull sharks, *Carcharhinus leucas*, between Caribbean Sea and Lake Nicaragua demonstrated by tagging. **Copeia**, n. 2, p. 336-338, 1971.

VALENTIN, J. L. Analyse des paramètres hydrbiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). **Marine Biology**, v. 82, n. 3, p. 259-276, 1984.

VALENTIN, J. L., LINS DA SILVA, N. M. & BASTOS, C. T. B. N. Les diatomées dans l'upwelling de Cabo Frio (Brésil): liste d'espèces et étude écologique. **Journal of plankton research**, v. 7, n. 3, p. 313-337, 1985.

WERRY, J. M., LEE, S. Y., LEMCKERT, C. J. & OTWAY, N. M. Natural or Artificial? Habitat-use by the bull shark, *Carcharhinus leucas*. **PLOS ONE**, 2012. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0049796>>. Acesso em: 16 jun. 2014.

WERRY, J. M., LEE, S. Y., OTWAY, N. M., HU, Y. & SUMPTON, W. A multi-faceted approach for quantifying the estuarine-nearshore transition in the life cycle of the bull shark, *Carcharhinus leucas*. **Marine and Fresh water Research**, v. 62, n. 12, p. 1421-1431, 2011.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a aparentemente baixa abundância de *C. leucas* nos ambientes costeiros da RMR, é possível que a sua ocorrência nesta região esteja associada com sua atividade predatória ao longo da plataforma continental brasileira, provavelmente realizada ao longo de grandes áreas, como sugerido pela grande distância percorrida pelo tubarão monitorado durante esse estudo e por estudos recentes indicando que esses animais não são tão sedentários como se acreditava.

Os tubarões cabeça-chata estiveram envolvidos em interações com humanos em outros lugares do mundo, e juntamente com os tubarões tigre, são responsáveis pela alta incidência desses eventos na costa da RMR. A utilização preferencial de águas costeiras rasas pelo tubarão monitorado pelo presente estudo, somada com a utilização de uma área estuarina durante a sua movimentação, reforça o perigo potencial que esta espécie constitui para banhistas na costa da RMR, uma região densamente populosa que engloba uma série de estuários ao longo da costa. Apesar das interações entre tubarões e humanos na costa da RMR ocorrerem com maior frequência durante os meses de inverno, os tubarões cabeça-chata são mais presentes nessa região durante o verão, sugerindo que outra espécie potencialmente agressiva e mais abundante, tal como o tubarão tigre, possa estar envolvida na maioria dos incidentes. Entretanto, apesar dos tubarões tigre alcançarem tamanhos superiores aos dos tubarões cabeça-chata, o tamanho médio dos *C. leucas* capturados pelo PROTUBA foi consideravelmente superior ao dos tubarões tigre, o que juntamente com o seu comportamento preferencialmente costeiro poderá incrementar o perigo potencialmente causado por essa espécie nessa região. Por conseguinte, será aconselhável proceder-se à inclusão de informações bioecológicas espécie-específicas sobre *C. leucas* na formulação de medidas de mitigação do risco de ataques de tubarão na costa da RMR.

As características e tendências descritas neste estudo sobre a bioecologia dos *C. leucas* do Oceano Atlântico Sul, estão em concordância com estudos anteriormente publicados para indivíduos dessa mesma espécie em outros locais do mundo e contribuem para aumentar o conhecimento científico a respeito dessa espécie em uma região onde pouco ainda se sabe sobre a mesma. Entretanto, pesquisas futuras envolvendo um maior número de espécimes amostrados são necessárias para uma melhor compreensão a respeito de aspectos importantes da bioecologia dos tubarões cabeça-chata nesta região, tais como reprodução, idade e crescimento, dieta e utilização de hábitat.

APÊNDICE I

Esta secção traz uma versão em português do resumo do artigo científico intitulado **Occurrence, biology and movements of the bull shark, *Carcharhinus leucas*, off northeastern Brazil**, submetido para publicação à revista **PLOS ONE**.

O tubarão cabeça-chata, *Carcharhinus leucas*, é uma espécie circumglobal de grande porte, comumente encontrada em habitats marinhos, estuarinos e de água doce em latitudes tropicais e temperadas. Ainda pouco se sabe sobre a sua bioecologia no Atlântico Sul Ocidental. Este estudo buscou analisar a biologia e ocorrência de tubarões cabeça-chata, e investigar os padrões de movimentação de um indivíduo marcado com um transmissor satélite na costa nordeste do Brasil. Os tubarões foram capturados entre Maio de 2004 e Dezembro de 2014 na costa da Região Metropolitana do Recife (RMR), utilizando linhas de espera e espinhéis de fundo como aparelhos de pesca. A ocorrência de *C. leucas* de acordo com gradientes espaço-temporais e ambientais foi investigada utilizando modelos aditivos generalizados inflacionados de zero. O sexo, maturação, conteúdo estomacal e relações entre diferentes medidas de comprimento e peso foram também registrados. Um total de 18 tubarões cabeça-chata foram capturados (proporção macho-fêmea = 0,63:1). Os tubarões tenderam a ser mais frequentes durante o verão, entre Novembro e Fevereiro, e durante períodos de lua cheia. Além disso, foram ainda verificados efeitos positivos na ocorrência de tubarões cabeça-chata associados a velocidades de vento baixas ($< 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), temperaturas da superfície do mar quentes ($> 26^\circ\text{C}$) e índices pluviométricos baixos ($< 200 \text{ mm}$). Os itens alimentares identificados compreenderam teleósteos, crustáceos, moluscos e elasmobrânquios. Um macho adulto foi marcado com um transmissor satélite por um período de 75 dias. Esse tubarão viajou em sentido sul através de uma longa distância total ($\sim 3.675 \text{ km}$) ao longo da plataforma continental brasileira, tendo provavelmente entrado em uma região estuarina por um período de ~ 3 dias no final do monitoramento. Esse tubarão tendeu a utilizar preferencialmente águas mais rasas ($< 5 \text{ m}$) durante a noite e enquanto exibindo comportamento residente, utilizando águas mais profundas ($> 20 \text{ m}$) da plataforma continental durante períodos de lua minguante. A clara preferência por habitats costeiros, demonstrada pelo tubarão monitorado durante este estudo, reforça a potencial vulnerabilidade da espécie às interferências antrópicas deletérias, as quais são tipicamente mais exacerbadas nessas regiões.

APÊNDICE II

Esta secção traz uma versão em português do resumo da nota científica intitulada **Spinal deformities in free-ranging bull sharks, *Carcharhinus leucas*, from the western South Atlantic Ocean**, submetida para publicação à revista **Journal of Applied Ichthyology**.

Dois *Carcharhinus leucas* adultos exibindo deformações vertebrais similares de natureza lordóticas e cifóticas nos lobos superiores de suas nadadeiras caudais foram capturados na costa de Recife, nordeste do Brasil. Exames radiográficos seguidos por dissecações revelaram significantes alterações ao alinhamento vertebral, concomitantes com fusões vertebrais e espondiloses sobre grandes segmentos (> 40 vértebras) em ambas as colunas vertebrais. Apesar de poluentes de origem antropogênica possivelmente serem os responsáveis por tais deformações, nenhum dos contaminantes investigados no tecido desses tubarões estiveram presentes em concentrações significantes, de modo que futuras pesquisas são necessárias para esclarecer a origem de deformações vertebrais nessa espécie.

APÊNDICE III

Esta secção traz uma versão em português do resumo do artigo científico intitulado **Inferring trends and linkages between shark abundance and shark-human interactions for shark hazard mitigation improvement**, submetido para publicação à revista **Marine and Freshwater Research**.

O entendimento das relações entre a abundância relativa de espécies de tubarão potencialmente perigosas (TPP) e a probabilidade de interações entre tubarões e humanos em regiões onde esses eventos costumam ocorrer com determinada frequência é essencial para se reduzir efetivamente o perigo nessas regiões. Este estudo buscou inferir sobre as ligações envolvidas entre a abundância local de tubarões e as interações entre tubarões e humanos a fim de fornecer informações importantes sobre a dinâmica espaço-temporal do risco de ataque na costa de Recife, Brasil. A área de estudo tem sofrido uma séria ocorrência de incidentes com tubarões desde 1992, correspondendo uma das regiões mais perigosas do mundo. Os dados de abundância de oito espécies de TPP foram coletados entre Maio de 2004 e Dezembro de 2014. Modelos aditivos generalizados mostraram que a dinâmica de distribuição da abundância de TPP e dos incidentes com tubarões foram razoavelmente similares, de acordo com gradientes espaciais, temporais e lunares. Além disso, a abundância mensal de TPP correlacionou positivamente com a frequência de interações entre tubarões e humanos. Análises espécie-específicas das espécies mais abundantes, i. e. *Galeocerdo cuvier* e *Carcharhinus leucas*, sugeriram que processos biológicos distintos poderão estar envolvidos na dinâmica geral do perigo causado por tubarões nesta região. Essa metodologia foi considerada útil para validar a estratégia local de mitigação de incidentes com tubarões, além de que permitiu verificar a dinâmica da componente biológica que regula a dinâmica das interações entre tubarões e humanos. Consequentemente, esta poderá ser uma importante ferramenta de mitigação do risco de ataque, capaz de fornecer informações sobre os fatores espaço-temporais e ambientais envolvidos no perigo causado por tubarões.