



Universidade dos Açores
Departamento de Biologia

Elasmobranchii (sharks and rays), a potential resource to protect in the Azores?

Paulo Gonçalves Miranda Agria Torres

Ponta Delgada
2016

@ Paulo Gonçalves Miranda Agria Torres
All rights preserved



Universidade dos Açores
Departamento de Biologia

Elasmobranchii (sharks and rays), a potential resource to protect in the Azores?

Paulo Gonçalves Miranda Agria Torres

A dissertation submitted to the University of the Azores in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Marine Sciences.

Supervisors:

Professor Doutor Armindo dos Santos Rodrigues
Professora Doutora Regina Tristão da Cunha
Doutor Rui Coelho

Ponta Delgada
2016



FUNDAÇÃO
LUSO-AMERICANA



Preliminary Note

I hereby testify that this thesis was of my own initiative, specially developed to this purpose. All scientific data obtained throughout this PhD project herein presented was submitted and published in indexed scientific journals (one of which currently under revision) as the following papers:

Torres P., Tristão da Cunha R., Maia R., Rodrigues A.S., 2014. Trophic ecology and bioindicator potential of the North Atlantic tope shark. *Sci Total Environ* 481: 574–581.

Torres P., Tristão da Cunha R., Rodrigues A.S., 2016. The elasmobranch fisheries of the Azores. *Mar Pol* 73: 108-118.

Torres P., Tristão da Cunha R., Micaelo C., Rodrigues A.S., 2016. Bioaccumulation of metals and PCBs in *Raja clavata*. *Sci Total Environ* 573: 1021–1030.

Torres P., Bolhão N., Tristão da Cunha R., Vieira J.A.C., Rodrigues A.S.. Dead or alive: the growing importance of shark diving in the Mid-Atlantic region. *J Nat Conserv*, *Accepted*.

Torres P., Tristão da Cunha R., Rodrigues A.S.. Mid-Atlantic Elasmobranchs: suitable metal scouts? *Mar Poll Bull*, *Under review*.

As these studies were undertaken in collaboration with other authors, I also declare that I have participated in designing and carrying out the experimental work, as well as in interpreting the results, and I was responsible for drafting and writing of the manuscripts that were sent for publication.

Paulo Gonçalves Miranda Agria Torres
Ponta Delgada, 2 December 2016

*É este que me fala
dum mar extraordinário, dum mar que é água e alimento ao mesmo tempo, dum mar como
leite, de que se sustentam peixes aos cardumes, peixes unidos uns aos outros formando uma
esteira quase compacta, sobre a qual se cevam milhares de aves enchendo o escuro de
palpitação e de gritos.*

Raul Brandão
As Ilhas Desconhecidas (1926)

Para ti,
Alexandre “O Pequenino” ...

Agradecimentos

Este projeto de doutoramento não teria sido possível sem a atribuição da bolsa de investigação FRC/M3.1.2/F/045/2011, a partir de Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE, e de fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto UID/BIA/50027/2013 e POCI-01-0145-FEDER-006821. Este trabalho contou também com o apoio do CIBIO-Pólo Açores (DRCT-M1.1.a/005/Funcionamento-C-/2016), pertencente ao Departamento de Biologia da Universidade dos Açores, e com o apoio financeiro por parte da Fundação Luso Americana para o Desenvolvimento (Projecto 275/2013).

Durante estes quatro anos estabeleceu-se um conjunto de parcerias importantes com as mais diversas entidades, essenciais para o desenvolvimento desta tese. Neste contexto, gostaria de agradecer à Inspecção Regional das Pescas, por intermédio do Dr. Rogério Ferraz, pelas informações cedidas e pela disponibilidade para tirar qualquer dúvida relativamente ao tema das pescas de elasmobrânquios nos Açores; ao Serviço de Lotas dos Açores, S.A., na pessoa do Dr. José Luís Amaral, pelas informações cedidas relativamente às descargas de tubarões e raias; à empresa de transformação e exportação de pescado António Mineiro & Andrade, Lda, nomeadamente ao Sr. Aurélio Mineiro, que nos facilitou o acesso às espécies capturadas.

Além destas parcerias, foi igualmente indispensável a promoção da participação de outros investigadores e grupos de investigação de modo a garantir uma variedade de especialistas, consultores e laboratórios imprescindíveis para o desenvolvimento do projeto e das tarefas subsequentes. Assim, no âmbito da ecologia alimentar e análise de isótopos estáveis, deixo aqui um agradecimento ao CRIE - Centro de Recursos em Isótopos Estáveis, da Fundação da Faculdade de Ciências de Lisboa da Universidade de Lisboa, nomeadamente ao Dr. Rodrigo Maia, e ao Dr. Carlos Vale do IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, por todo o apoio no âmbito do trabalho de análise dos PCBs.

Gostaria de deixar um agradecimento especial ao centro de mergulho Cetacean Watching, nomeadamente à Dania Tesei e ao Enrico Villa, sediado na Madalena, Ilha do Pico, pela simpatia com que me receberam e por todo o apoio prestado no acompanhamento dos mergulhos com tubarão. Uma palavra de apreço também para a

disponibilidade de todos os trabalhadores da empresa, em especial para o companheiro Stefano Ulivi.

Este projecto também não teria sido possível sem o apoio e a orientação certa, principalmente, nos momentos mais incertos. Assim, gostaria de agradecer aos meus orientadores, a Professora Doutor Regina Tristão da Cunha e o Doutor Rui Coelho, e um muito sentido e merecido reconhecimento para o Professor Doutor Armindo dos Santos Rodrigues pela disponibilidade demonstrada em todos os momentos deste trabalho, por todo o seu apoio incondicional e pela boa disposição com que sempre me acompanhou durante estes anos. Também um agradecimento particular à Professora Doutora Patrícia Garcia pela disponibilidade que sempre mostrou, seja a rever artigos ou a contribuir de algum modo para os mesmos.

Gostaria de agradecer o apoio técnico do pessoal do laboratório, ao Ricardo Camarinho e ao “Joca”, ao Nuno Bolhão por todo o apoio logístico, e ao João Brum, esse grande apaixonado por tubarões. Deixo aqui também um agradecimento muito especial à Maria Ana Dionísio, sem a qual, por muitas razões, esta tese não teria sido possível.

Por último, mas não menos importante, estendo os meus agradecimentos pessoais aos meus colegas e amigos por todos os momentos de lazer e descontração e, especialmente, aos meus pais, os meus mais fiéis admiradores, por toda a eterna paciência que sempre demonstraram nas minhas aventuras e desventuras.

Finalmente, uma palavra fofinha para ti, Aninhas, pelo apoio na elaboração de algumas figuras, pela revisão de parte dos textos e, principalmente, por teres aguentado os meus desvarios sempre com um olhar meigo e compreensivo, principalmente na recta final desta tese quando, como tu muito bem sabes, tudo parecia estar contra nós. De facto, se não fosses tu, muito provavelmente, este tese nunca chegaria a bom porto.

E, como não podia deixar de ser, um obrigado muito especial ao Alexandre “O Pequenininho” por todas as noites e dias em que me manteve, sem possibilidade de escolha, acordado! A motivação certa que tornou possível acabar esta tese no seu devido tempo...

Abstract

Elasmobranchs (sharks and rays) evolution, over approximately 450 million years, shaped numerous successful species, developing at the same time specific life-traits (slow growth, late attainment of sexual maturity, long life spans and low fecundity), which made them particularly susceptible to human activities such as fishing, habitat degradation and pollution. In the Azores, in the middle of Northeast Atlantic Ocean, where many species occur or pass by, some constitute an important local, national and/or foreign socio-economic component as a food source and/or ecotourism resource. This thesis aimed to increase our knowledge on elasmobranchs occurring in the Azores, given their importance to the region. The study covered fisheries, ecotoxicology and ecotourism issues, targeting 4 main species usually landed as bycatch: thornback ray *Raja clavata*, tope shark *Galeorhinus galeus*, blue shark *Prionace glauca* and shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus*. Each species presented different management challenges which should be addressed with some care, considering the Northeast Atlantic context and local, national and foreign interests. These high trophic level species are also known to accumulate alarming levels of pollutants such as persistent organic pollutants or heavy metals as arsenic (As), cadmium (Cd), mercury (Hg) or lead (Pb) potentially dangerous for elasmobranch health and especially for human consumption safety. In the overall, all four species shared the same trophic level in a pelagic-based food web and did not present relevant significant differences between genders or metals, except for As. The results also reflected bioaccumulation processes for As and Hg while Cd and Pb were not detected in muscle tissue. Metal content was related to the Azores volcanic nature although generally lower when compared to other less pristine areas from previous studies. *Raja clavata* was also analysed for Polychlorinated biphenyls (PCBs) for both muscle and liver tissue. This species presented low concentrations of PCBs, especially the dioxin-like congeners, although always higher in liver and not correlated with size. None of these contaminants exceed European Union legislated limits except one individual of *I. oxyrinchus*, which presented Hg content above regulatory limits. The studied elasmobranch species demonstrated great potential to be used as biological sentinels of metal pollution, each presenting different characteristics regarding the key features that define a good marine bioindicator, allowing long-term monitoring at different temporal and spatial scales. *Prionace glauca* and *I. oxyrinchus* are also

focused by the recent shark diving industry in the Azores, an economic alternative to fishing which promotes an ecological and economical sustainable use of these species. The estimated generated income of shark diving in 2014 amounts to 1,983.347€ (around US\$2,244.890) which may will easily increase considering the current fast expansion of (eco)tourism in the Azores and the activity infancy. Given the unique features of the Archipelago, socio-economic needs and potential and natural resources availability, this study focusing these charismatic species of the Mid-Northeast Atlantic region provided new important information for decision-makers to develop more efficient monitoring protocols, contributing to a better management and protection of these valuable marine resources.

Resumo alargado

A evolução dos elasmobrânquios (tubarões e raias), ao longo de aproximadamente 450 milhões de anos, deu origem a numerosas espécies bem sucedidas, desenvolvendo ao mesmo tempo certos atributos (crescimento lento, elevada longevidade, maturação sexual tardia e baixa fecundidade) que as tornaram particularmente susceptíveis a actividades humanas como a pesca, a degradação do habitat e a poluição. Tendo em conta a sua localização, sensivelmente a meio do Oceano Atlântico Nordeste, o Arquipélago dos Açores serve de habitat a muitas espécies de elasmobrânquios, de refúgio, reprodução ou alimentação a tantas outras e ainda, simplesmente, como zona de passagem para algumas avistadas pontualmente. Estas espécies constituem um importante componente socioeconómico local, nacional e/ou internacional, quer como recurso alimentar ou ecoturístico. Contudo, tendo em conta o seu elevado nível trófico, têm, em virtude da sua dieta, a potencialidade de acumular níveis alarmantes de poluentes, tais como poluentes orgânicos persistentes ou metais pesados como o arsénio (As), o cádmio (Cd), o mercúrio (Hg) ou o chumbo (Pb), potencialmente perigosos para a própria saúde dos elasmobrânquios e, conseqüentemente, no âmbito da segurança alimentar humana.

A presente dissertação teve como objectivo aprofundar o nosso conhecimento sobre as populações de elasmobrânquios dos Açores, tendo em conta a sua importância para a região. O estudo abrangeu diversas temáticas como a pesca, a ecotoxicologia e o ecoturismo, visando 4 espécies principais, aparentemente capturadas acidentalmente (*bycatch*): a raia *Raja clavata*, o cação *Galeorhinus galeus*, o tubarão-azul *Prionace glauca* e o tubarão mako *Isurus oxyrinchus*. Mais recentemente, as espécies *P. glauca* e *I. oxyrinchus* são têm sido igualmente exploradas por uma nova indústria nos Açores – o mergulho com tubarões, uma alternativa económica à pesca, ecologicamente mais sustentável, que carecia de avaliação.

Este documento encontra-se seccionado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre os elasmobrânquios e as temáticas em estudo, define os objetivos e aponta a estrutura da tese. O capítulo 2 apresenta uma visão geral e integrada da pesca comercial de elasmobrânquios nos Açores nas últimas duas décadas, levantando questões importantes e destacando desafios e prioridades na gestão de cada espécie de acordo com as suas especificidades. O capítulo 3 examina as

concentrações de metais pesados no músculo (tecido edível), de acordo com o tamanho e género, das quatro principais espécies de elasmobrânquios de importância socioeconómica para os Açores e analisa as respectivas implicações para a saúde destas espécies e para a segurança alimentar humana. Os isótopos estáveis ($\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{13}\text{C}$) foram igualmente analisados com o objectivo de estudar a ecologia alimentar destas elasmobrânquios e clarificar os principais vectores de acumulação dos metais detectados. Para a raia *R. clavata* determinou-se também o conteúdo de bifenilos policlorados (PCBs), tanto no tecido muscular como no tecido hepático (o primeiro estudo sobre o tema realizado na região). Para além disso, pretendeu-se discutir o potencial bioindicador destas espécies, estabelecendo uma linha de base para futura monitorização. O capítulo 4 aborda os aspectos socioeconómicos da recente indústria de mergulho com tubarões, através da análise das receitas directas e indirectas e de dados sobre o conhecimento, as expectativas e a experiência de mergulho com tubarões. Esta informação é utilizada para discutir o uso recreativo dos tubarões como alternativa à pesca e as potenciais implicações para a conservação das espécies de tubarões. O capítulo 5 sintetiza as principais conclusões e fornece uma perspectiva futura sobre as questões de pesquisa levantadas.

Cada espécie apresentou diferentes desafios de gestão de stock que deverão ser criteriosamente abordados com alguma cautela, considerando o contexto do Atlântico Nordeste em que estas pescarias se inserem e os interesses locais, nacionais e internacionais. De uma forma geral, as quatro espécies partilham o mesmo nível trófico numa cadeia alimentar oceânica e não apresentaram diferenças significativas entre géneros ou relativamente à acumulação de metais, com excepção para o As. Os resultados refletiram igualmente processos de bioacumulação para As e Hg, enquanto Cd e Pb não foram detectados no músculo. O teor em metais detectado é, de uma forma geral, inferior quando comparado com outras áreas menos pristinas do que os Açores. Porém, alguns metais apresentaram concentrações relevantes, provavelmente relacionados com a natureza vulcânica do arquipélago. A raia *R. clavata* apresentou baixas concentrações de PCBs, especialmente os congéneres com potencialidades mais tóxicas, embora sempre superiores no fígado e não correlacionados com o tamanho. Nenhum destes contaminantes excedeu os limites legais definidos pela União Europeia, excepto num indivíduo de *I. oxyrinchus* que apresentou um teor de Hg acima dos limites legislados, embora ainda juvenil. As espécies de elasmobrânquios estudadas demonstraram um grande potencial para serem utilizadas como

bioindicadores marinhos para a poluição de metais, cada uma com características distintas que definem uma boa espécie bioindicadora, permitindo uma monitorização a longo prazo, a diferentes escalas temporais e espaciais. O mergulho com tubarões em 2014 gerou uma receita estimada em 1.983.347€ (cerca de US\$ 2.244.890), valor que tenderá facilmente a aumentar, considerando que é uma actividade muito recente e a actual rápida expansão do (eco)turismo nos Açores.

Cada espécie apresenta diferentes desafios de gestão como recurso pesqueiro, de acordo com as suas características intrínsecas. A qualidade dos dados das estatísticas oficiais de desembarque deve ser melhorada para evitar problemas de identificação e permitir melhores estimativas de capturas ilegais, não declaradas e não regulamentadas, de modo a que seja possível produzir ferramentas de gestão e avaliação mais adequadas. Em relação às espécies migratórias (*P. Glauca* e *I. oxyrinchus*), é necessária uma abordagem multinível, tendo em conta os interesses regionais, nacionais e internacionais.

Uma das principais conclusões deste estudo é a possível existência de uma população de *Galeorhinus galeus* nos Açores, com base em dados de isótopos estáveis e metais pesados, que deverá ser abordada no futuro, especialmente tendo em conta a avaliação e gestão do *stock*.

Este trabalho demonstrou também a necessidade de aumentar o conhecimento da fisiologia e ecologia dos elasmobrânquios, principalmente no que se refere à absorção e eliminação de poluentes. Neste contexto, a análise de isótopos estáveis e de metais em vários tecidos/órgãos, fornecerão não só, uma perspectiva temporal, como também irão permitir determinar as principais vias de acumulação e destoxificação. Adicionalmente, é crucial desenvolver biomarcadores, relacionados, por exemplo, com a peroxidação lipídica (LPO), stresse oxidativo ou danos no DNA, para detectar alterações específicas precoces antes que estas possam afectar gravemente os organismos.

Os elasmobrânquios revelaram ser um bom potencial bioindicador de metais pesados. No entanto, considerando as suas diferentes dietas e dado que estes poluentes se acumulam preferencialmente em tecidos distintos, seria imprescindível, em trabalhos futuros, uma análise mais abrangente com a utilização de várias espécies e diferentes tecidos/órgãos. A análise de isótopos estáveis e/ou técnicas de marcação

(*tagging*) serão igualmente técnicas úteis, que permitirão uma delimitação temporal e espacial mais eficaz da área em estudo.

A sustentabilidade da indústria de mergulho de tubarões nos Açores não depende apenas de uma gestão adequada das pescas, mas também da manutenção de experiências de alta qualidade e da avaliação e mitigação de possíveis impactos negativos nas espécies alvo. Assim, trabalhos futuros sobre o tema devem focar questões como a alimentação (*chumming*), o comportamento e a conformidade com o código de conduta, assegurando a satisfação e a protecção do cliente e das espécies. Nos Açores, há também uma modalidade de mergulho específico com a manta *Mobula tarapacana* que, embora não seja alvo de pesca, deverá ser avaliada e analisada do mesmo modo, contribuindo para a sua sustentabilidade.

Tendo em conta as características únicas do Arquipélago, as suas necessidades socioeconómicas e os recursos potenciais e/ou naturais disponíveis, este estudo centrado nestas espécies carismáticas, proporcionou novas informações valiosas para auxiliar os decisores políticos no desenvolvimento de protocolos de monitorização e de gestão mais eficientes na salvaguarda destes inestimáveis recursos marinhos.

A região dos Açores, isolada no Atlântico, tem conseguido manter-se relativamente pristina ao longo da sua história. No entanto, num futuro próximo, o inevitável aumento da população humana e da consequente pressão antropogénica sobre o oceano tenderão a afectar os seus limitados recursos vivos. Localizada entre os Estados Unidos e a Europa, a região enfrenta um novo desafio ambiental devido ao expectável aumento do comércio transatlântico. Além disso, a potencial riqueza mineral dos seus fundos marinhos tem atraído o interesse de muitas empresas estrangeiras, prevendo-se uma actividade que sem dúvida alguma irá afectar os ecossistemas marinhos. Por outro lado, já se começam a sentir nas ilhas os impactos de uma indústria de turismo em franco crescimento que já requer mais alimento, energia, infra-estruturas, tecnologia e espaço para o seu próprio desenvolvimento. Neste contexto, este trabalho contribuiu para estabelecer um conjunto de várias variáveis de referência, reflectindo o potencial dos Açores como uma estação natural para futura monitorização do Atlântico Norte.

Nota: O autor escreve, por opção pessoal, de acordo com o antigo acordo ortográfico.

Table of contents

Chapter 1 – General introduction	1
Elasmobranchii	3
<i>A brief history</i>	3
<i>Biological and ecological features</i>	7
<i>Elasmobranchs and humans</i>	8
<i>The “silent” threat</i>	11
The Azores	13
<i>The volcanic “soul” of the Northeast Atlantic</i>	13
<i>“Azorean” Elasmobranchs</i>	15
Objectives and thesis outline	21
References	23
Chapter 2 – Elasmobranchs as a fishery resource	31
The elasmobranch fisheries of the Azores	33
Abstract	33
Introduction	33
<i>The Azores</i>	34
The elasmobranch resource	35
Methodology	37
The Azorean elasmobranch fisheries	37
<i>Bottom longline and handline</i>	41
<i>Pelagic longline</i>	44
Discussion	48
<i>Bycatch</i>	48
<i>Discard rates</i>	49
<i>Misidentification issues</i>	49
<i>Species biological traits</i>	50
Conclusions	51
Acknowledgements	52
References	52
Chapter 3 – Elasmobranchs bioindicator potential of marine pollution	57
3.1 Trophic ecology and bioindicator potential of the North Atlantic tope shark	59
Abstract	59
Introduction	59
Methodology	61
<i>Sample collection and preparation</i>	61
<i>Stable isotope analyses</i>	62
<i>Trophic position (TP) estimation</i>	62
<i>Trace metal analyses</i>	64
<i>Data analyses</i>	64

Results	65
Discussion	70
<i>Stable isotope profiles and trophic position</i>	70
<i>Trace metal content</i>	73
Conclusions	76
Acknowledgements	76
References	77
3.2 Bioaccumulation of metals and PCBs in <i>Raja clavata</i>	81
Abstract	81
Introduction	81
Methodology	84
<i>Sample collection and preparation</i>	84
<i>Stable isotope analyses</i>	84
<i>Trophic position (TP) estimation</i>	85
<i>Trace metal analyses</i>	86
<i>PCB analyses</i>	87
<i>Data analyses</i>	87
Results	88
Discussion	93
<i>Feeding ecology</i>	93
<i>Metal bioaccumulation and biomagnification</i>	94
<i>PCBs profile</i>	97
Conclusions	98
Acknowledgements	99
References	99
3.3 Mid-Atlantic Elasmobranchs: suitable metal scouts?	107
Abstract	107
Introduction	108
Methodology	110
<i>Sample collection and preparation</i>	110
<i>Stable isotope analyses and trophic position</i>	110
<i>Metal analyses</i>	112
<i>Data analyses</i>	112
Results	113
Discussion	118
<i>Dietary tracers</i>	118
<i>Biological and ecological factors influencing metal levels</i>	119
<i>Implications for elasmobranch and human health</i>	123
<i>Elasmobranchs: suitable metal bioindicators?</i>	125
Conclusions	127
Acknowledgements	128
References	128

Chapter 4 – Elasmobranchs as an ecotourism resource	135
Dead or alive: the growing importance of shark diving in the Mid-Atlantic region	137
Abstract	137
Introduction	137
Methodology	140
<i>Study area</i>	140
<i>Shark diving</i>	141
<i>Survey design and implementation</i>	143
<i>Shark diving revenue analysis</i>	143
Results	144
<i>Respondents profile</i>	144
<i>Participant dive experience</i>	146
<i>Expenditures, willingness to pay and valuation</i>	147
Discussion	150
<i>Divers expectations and potential negative impacts of shark diving</i>	150
<i>Economic value of shark diving</i>	151
<i>Shark diving vs shark fishing</i>	153
Conclusions	155
Acknowledgements	155
References	156
Chapter 5 – Final remarks	159
Elasmobranchii (sharks and rays), a potential resource to protect in the Azores?	161
Future perspectives	163

List of figures

Chapter 1 – General introduction

- Figure 1. The relative diversity and abundance of holocephalans and elasmobranchs indicated over geological time. The relative rates of extinction of marine genera with a scale of geological time are below and the geological eras and periods are indicated above. Denoted on the time record is when dermal denticles, teeth or skeleton remains of the different genera of chondrichthyan fishes have been found in fossil deposits worldwide. Adapted from Klimley (2013). 4
- Figure 2. A) *Cladosepache fylleri*; B) *Stethacanthus altonensis*; C) *Ptychodus mortoni*. 5
- Figure 3. Identification of the 8 living shark orders according to Compagno (1984). Adapted from @Chris huh. 6
- Figure 4. Identification of the 5 living Batoidea orders according to Nelson (2006). Adapted from @untamedscience.com. 6
- Figure 5. A) The landed catch of chondrichthyans reported to the Food and Agriculture Organization of the United Nations from 1950 to 2009 up to the peak in 2003 (black) and subsequent decline (red); B) The rising contribution of rays to the taxonomically-differentiated global reported landed catch: shark landings (light grey), ray landings (black), log ratio [rays/sharks], (red). Log ratios >0 occur when more rays are landed than sharks; C) The main shark and ray fishing nations are grey-shaded according to their percent share of the total average annual chondrichthyan landings reported to FAO from 1999 to 2009. The relative share of shark and ray fin trade exports to Hong Kong in 2010 are represented by fin size. Adapted from Dulvy et al. (2014). 10
- Figure 6. Bioaccumulation and biomagnification. Adapted from @http://iasmania.com. 12
- Figure 7. Geographical location of the Azores archipelago. A) Location of the Azores archipelago in the North Atlantic Ocean illustrating the regional setting of the Azores archipelago within the North American, Eurasian, and Nubian triple junction. Solid white lines correspond to the plate boundaries (Mid-Atlantic Ridge and Azores-Gibraltar fault system); the light white shadowing depicts the Eurasia-Nubia boundary in the Azores. Bathymetry/altimetry was extracted from the ESRI web portal (<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisonline/map-services.html>). B) Bathymetry of the Azores region. Solid white line depicts the Mid-Atlantic Ridge; Islands: C—Corvo; FI—Flores; Fa—Faial; P—Pico; SJ—São Jorge; G—Graciosa; SM—São Miguel; STM—Santa Maria. Bathymetry was extracted from the EMODNET web portal (<http://portal.emodnet-bathymetry.eu>); subaerial topography was generated from a 1:5000 scale digital altimetric database. 14
- Figure 8. A) *Raja clavata*; B) *Galeorhinus galeus*; C) *Prionace glauca*; D) *Isurus oxyrinchus*. 16

Chapter 2 – Elasmobranchs as a fishery resource

The elasmobranch fisheries of the Azores

- Figure 1. Major elasmobranch species landings (total weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013. 38
- Figure 2. Distribution of elasmobranch species landings (total weight-tonnes) in the 9 Islands reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013. 38
- Figure 3. Distribution of elasmobranch species landings (%) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013. 39
- Figure 4. Annual elasmobranch landings (total weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013. Average annual PPK (price per kilogram in Euros-€) is represented by solid line. 40
- Figure 5. Percentage of tope shark *Galeorhinus galeus*, thornback ray *Raja clavata* and blue shark *Prionace glauca* landings according to boat size reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013. 40

Figure 6. Tope shark *Galeorhinus galeus* (A) and thornback ray *Raja clavata* (B) annual landings (wet weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013 from local auction house. Average annual PPK (price per kilogram in Euros-€) is represented by solid line. 41

Figure 7. Distribution of tope shark *Galeorhinus galeus* (A) and thornback ray *Raja clavata* (B) main fishing areas reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013 from logbooks. Dark squares correspond to major catches. 42

Figure 8. Tope shark *Galeorhinus galeus* and thornback ray *Raja clavata* average (\pm SE) monthly catches (wet weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013 from local auction house. 43

Figure 9. Tope shark *Galeorhinus galeus* and thornback ray *Raja clavata* average (\pm SE) monthly ratio compared to the blackspot seabream *Pagellus bogaraveo* catches (fishery main species) reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013 from logbooks. 43

Figure 10. Blue shark *Prionace glauca* (A) and shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* (B) annual landings (wet weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 1993 and 2013 from local auction house and between 2007 and 2013 from logbooks (darker bars). Average annual PPK (price per kilogram in Euros-€) is represented by solid line. 45

Figure 11. Distribution of blue shark *Prionace glauca* (A) and shortfin mako *Isurus oxyrinchus* (B) main fishing areas reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013 from logbooks. Dark squares correspond to areas with major catches. 46

Figure 12. Blue shark *Prionace glauca* (A) and shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* (B) average (\pm SE) monthly catches (wet weight-tonnes) reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013 from logbooks. 47

Figure 13. Blue shark *Prionace glauca* (A) and shortfin mako shark *Isurus oxyrinchus* (B) average (\pm SE) monthly ratio compared to the swordfish *Xiphias gladius* (fishery main species) catches reported for the Azorean commercial fishery between 2007 and 2013 from logbooks. 47

Chapter 3 – Elasmobranchs bioindicator potential of marine pollution

3.1 Trophic ecology and bioindicator potential of the North Atlantic tope shark

Figure 1. Number of individuals (N) and average (\pm SD) $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic profiles, expressed in ‰, of tope shark muscle for each sex, by size class (cm). Open and black symbols represent males and females, respectively. Different symbols represent the different size classes: circles indicate small (<80 cm), triangles medium [80-100 cm) and squares large (>100 cm). N is the number of sharks sampled according to sex and size. 66

Figure 2. Average (\pm SD) $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ profiles for tope shark muscle by sex and size class (cm), expressed in ‰. Different letters represent significant differences between sexes within each size class (Student t-test, $p < 0.05$) and different numbers represent significant differences between size classes for each sex (post-hoc Tukey test, $p < 0.05$). N is the number of sharks sampled. 66

Figure 3. Average (\pm SD) of trace metal concentrations in tope shark muscle according to size class (cm) and sex. Results are expressed as mg kg^{-1} wet weight. Different letters represent significant differences between sexes within each size class (Student t-test, $p < 0.05$) and different numbers represent significant differences between size classes for each sex (post-hoc Tukey test, $p < 0.05$). N is the number of sharks sampled according to sex and size. The solid lines represent the metal maximum limits legislations for different countries regarding mercury; x) Australia (NHMRC 1987) and India (DAED 1991); y) Japan (Nakagawa et al. 1997); z) United States (EPA 2001). 69

Figure 4. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic values of two food chains, each with four trophic levels. A – North-East Atlantic (solid lines): particulate organic matter (Sarà et al. 2009); zooplankton (Chouvelon et al. 2012); mackerel (Chouvelon et al. 2012)/squid (Chouvelon et al. 2011); tope shark (Domi et al. 2005). B – Mid-Atlantic (dashed lines): particulate organic matter (Colaço et al. 2013); zooplankton (Colaço et al. 2013); blue jack/boarfish (Colaço et al. 2013); and tope shark (this study). 72

3.2 Bioaccumulation of metals and PCBs in *Raja clavata*

Figure 1. Heavy metal concentrations in all *Raja clavata* individuals sampled in muscle and liver tissue according to total length (cm). Results are expressed as mg kg⁻¹ wet weight. Black circles represent muscle tissue and grey circles represent liver tissue. Only significant increases of heavy metal concentrations with size are represented in the figure, with the respective regression equation and always for muscle tissue. 90

Figure 2. Average (+SE) proportion of PCB in muscle and liver tissue for each PCB congener of all *Raja clavata* individuals sampled. 92

Figure 3. Relationship between total PCBs in muscle and liver tissue in relation to total length (cm) of all *Raja clavata* individuals sampled. Black circles represent muscle tissue and grey circles represent liver tissue. 92

3.3 Mid-Atlantic Elasmobranchs: suitable metal scouts?

Figure 1. Metal concentrations in muscle tissue from *Prionace glauca* and *Isurus oxyrinchus* according to total length (cm). Results are expressed as mg kg⁻¹ wet weight. Black circles represent *Prionace glauca* and grey circles represent *Isurus oxyrinchus*. Only significant increases of metal concentrations with size are represented in the figure, with the respective regression equation and only for *Prionace glauca*. 116

Figure 2. Metal concentrations of *Raja clavata*, *Galeorhinus galeus*, *Prionace glauca* and *Isurus oxyrinchus* in muscle tissue (mg kg⁻¹ wet weight). Within the boxes, the line is the median, 1st and 3rd quartiles, maximum and minimum values. Different letters represent significant differences ($p < 0.05$). 117

Chapter 4 – Elasmobranchs as an ecotourism resource

Dead or alive: the growing importance of shark diving in the Mid-Atlantic region

Figure 1. A) Map illustrating the bathymetry of the Azores region. Islands: C-Corvo; FI-Flores; SJ-São Jorge; G-Graciosa; SM-São Miguel; STM-Santa Maria. B) Location of the Azores Archipelago in the North Atlantic Ocean. Bathymetry on both subfigures A and B was extracted from the EMODNET web portal (<http://portal.emodnet-bathymetry.eu>); subaerial topography was generated from a 1:5000 scale digital altimetric database. C) Detail of the bathymetry of the Condor seamount area (adapted from Tempera et al. 2013). 141

Figure 2. Shark diving schematics. 142

Figure 3. Demographic frequency distributions of shark diving participants surveyed in the Azores in 2014. A – Divers gender and age classes; B – Divers nationality; C - Divers monthly income, excluding taxes (€); D - Divers education level; E – Divers main reason to visit the Azores; F – Divers average length of stay. 145

Figure 4. Average (\pm SE) factors contributing to participant enjoyment of shark diving experience (from a scale of one [poor] to five [excellent]). 146

Figure 5. Frequency distributions of divers' willingness to pay (A) and area of investment of that extra amount (B). 149

List of tables

Chapter 1 – General introduction

Table 1. Number of elasmobranch species in IUCN Red List categories. CR, Critically Endangered; EN, Endangered; VU, Vulnerable; NT, Near Threatened; LC, Least Concern; DD, Data Deficient.	10
Table 2. Elasmobranch studies in the Azores study. * Master thesis	17

Chapter 3 – Elasmobranchs bioindicator potential of marine pollution

3.1 Trophic ecology and bioindicator potential of the North Atlantic tope shark

Table 1. Two-way ANOVA results on stable isotope ratios and metal concentrations in <i>Galeorhinus galeus</i> muscle according to sex, size class (cm) and interaction between both factors (Sex*Size). Significant results are in bold characters.	67
Table 2. Estimated trophic position by $\delta^{15}\text{N}$ (TPSI) for each sex, size class (cm) according to each potential prey species of <i>Galeorhinus galeus</i> . Different letters represent significant differences (post-hoc Tuckey test, $p < 0.05$).	67
Table 3. Model estimates of main prey groups and fish species contributions to <i>Galeorhinus galeus</i> diet provided by MixSIR (median, 5 th and 95 th percentiles) using isotopic discrimination factors 3.4‰ and 1.0‰ for $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$, respectively. Histograms represent the distributions of posterior probabilities of source contributions.	68

3.2 Bioaccumulation of metals and PCBs in *Raja clavata*

Table 1. Sex, number, average total length, disc width, disc length and weight (\pm SE), maximum, minimum (range) and total length–weight (W-TL) relationships based on $W = aTL^b$ of <i>Raja clavata</i> specimens captured.	88
Table 2. Average (\pm SE) and range of $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ (‰) and heavy metal (mg kg ⁻¹ dry weight) profiles of <i>Raja clavata</i> individuals sampled for muscle and liver tissues, according to sex, and respective prey. Different letters represent significant differences ($p < 0.05$). N is the number of sharks sampled according to sex and size.	89
Table 3. Estimated trophic position according to different authors (average (\pm SE) and range) for all <i>Raja clavata</i> individuals sampled according to each potential prey species. Different letters represent significant differences between models and different numbers represent significant differences between prey species ($p < 0.05$).	91
Table 4. Average concentrations and min–max (range) values of PCBs (ng g ⁻¹) in <i>Raja clavata</i> muscle and liver, according to sex. N is the number of sharks sampled according to sex and size.	91

3.3 Mid-Atlantic Elasmobranchs: suitable metal scouts?

Table 1. Average (\pm SE) and range of $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ (‰) profiles, trophic position (TP) according to Hussey et al. (2014) and metals concentration (mg kg ⁻¹ wet weight) of elasmobranch species for muscle tissue. N is the number of individuals sampled.	114
Table 2. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ (‰) profiles, trophic position (TP) and metals concentration mean differences and p-values based on post hoc tests Tukey's tests for paired comparisons. Significant differences between species for each variable ($p < 0.05$) are in bold.	115
Table 3. Comparison of metal concentrations (mg kg ⁻¹ wet weight) found in muscle tissues from different studies with these 4 elasmobranch species. Data is presented as mean, mean \pm SD, mean \pm SE or range, as found on the literature.* values in dry weight.	120

Chapter 4 – Elasmobranchs as an ecotourism resource

Dead or alive: the growing importance of shark diving in the Mid-Atlantic region

Table 1. Summary of responses to questionnaire about shark encounters experienced by survey respondents and reasons for touching. 147

Table 2. Participant expenditure items related to the shark diving experience. AV_i - average expenditure per specific shark diving tourist according to each expense item i ; δ - average value of shark diving revenues of opportunistic divers, who did not come to the Azores for shark diving. 148