

CÁREN BEATRIZ DOS SANTOS FELIX DA SILVA

**ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE OTÓLITOS DE *Caranx latus*
NO LITORAL DE PERNAMBUCO – BRASIL.**

Recife

Maior de 2024.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA

ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE OTÓLITOS DE *Caranx latus*
NO LITORAL DE PERNAMBUCO – BRASIL.

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 02/05/2024 pela comissão examinadora.

Área de concentração: Biometria e Estatística Aplicada.

Orientador: Dr. Paulo José Duarte Neto

Co-orientador: Jonas Eloi de Vasconcelos Filho

Recife

Maio de 2024.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586a Silva, Cáren Beatriz dos Santos Felix da.
Análise morfométrica de Otólitos de *Caranx latus* no litoral de Pernambuco –
Brasil / Cáren Beatriz dos Santos Felix da Silva. – Recife, 2024.
45 f.: il.

Orientador(a): Paulo José Duarte Neto.
Coorientador: Jonas Eloi de Vasconcelos Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa
de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife, BR-PE, 2024.
Inclui referências e apêndice(s).

1. Otólitos. 2. Morfometria. 3. Morfologia. 4. Fourier, Análise de. I. Duarte Neto,
Paulo José, orient. II. Vasconcelos-Filho, Jonas Eloi, coorient. III. Título

CDD 310

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA

Análise Morfométrica de Otólitos de *Caranx latus* no litoral de Pernambuco – Brasil.

Cáren Beatriz dos Santos Felix da Silva

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 02/05/2024 pela comissão examinadora.

Orientador:

Dr. Paulo José Duarte Neto

Orientador

Banca examinadora:

Dr. Guilherme Rocha Moreira

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Jonas Eloi de Vasconcelos Filho

Coorientador

Dedico essa dissertação aos meus grandes amores, meu filho Bento e ao meu irmão Edgar, que são minha fonte inesgotável de felicidade.

Agradecimentos

À Deus por me sustentar até aqui, por ser sempre presente em minha vida, me ajudando a passar por toda barreira, especialmente por toda provação nos últimos 2 anos.

À minha família por todo apoio dado nesse caminho tão difícil. Em especial, aos meus pais, Cosmo e Benedita, que me incentivaram e investiram em minha educação, onde não mediram esforços, fazendo das “tripas coração”, abrindo mão de tudo que podia e não podia, para que eu chegasse onde eu cheguei. Vocês foram e são o meu combustível diário. Muito obrigada!

Ao meu filho, Bento Felix Monteiro, que foi meu combustível e alegria diária. Minha maior e melhor surpresa do mestrado. Que me deu um outro olhar e um novo propósito para a vida, minha tempestade e minha calmaria. Não sei como vivi tanto tempo sem você comigo. Mamãe te ama muito.

Ao meu Orientador Dr. Paulo José Duarte Neto, pela oportunidade, parceira de trabalho e principalmente pela grande paciência nesses 2 anos. Não foi fácil, sua contribuição e confiança para comigo, foram essenciais para chegar onde cheguei. Meu eterno agradecimento!

Ao meu coorientador Dr. Jonas Eloí de Vaconcelos-Filho, pelo grande apoio, parceria e constante participação na pesquisa, por ter se tornando um grande amigo que me ensinou a “Estatística no R” da melhor forma possível e me mostrou que é uma das melhores ferramentas. Meu eterno agradecimento!

Ao Dr. Júlio Guazelli Gonzalez e Dr. Thierry Frédou pela disponibilidade e auxílio nos dados da pesquisa dos otólitos analisados nesse trabalho.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado concedida, tornando possível minha estabilidade nesse período de Pandemia.

A todos os meus amigos e colegas que me ajudaram de alguma forma na etapa da pesquisa. Joalysson Andrade e Bruno Chapoval por não permitirem que eu desistisse, a Isabelly Omena e Maria Roberta por me ouvirem e orarem por mim, a Vanessa Karoline por ser meu porto seguro e Otavio Henrique por acreditar e vibrar tanto por mim. A meu

parceiro de alma, Júlio Barbosa, que foi meu ponto de paz, que não me largou nos piores momentos. Amo vocês. As minhas irmãs, Calana Brenda e Camila Bridja, pelo suporte, incentivo e cuidado com meu Bento. Ao meu irmão Anthony Edgar, pelo companheirismo e amor com Bentinho. Amo vocês.

A todos que fazem parte do PPGBEA (docentes, discentes, secretario, servidores), que contribuíram de alguma forma nesse período tão conturbado que foi a pandemia, em especial Mickaelle Almeida, João Rocha, Josafá Reis e Andréia Renilda. Aos meus professores da graduação em Licenciatura em Matemática pela Universidade de Pernambuco, que mostraram a beleza de calcular e contribuíram pelo conhecimento adquirido durante a minha formação. Um agradecimento especial a minha orientada, professora e amiga Dr^a Marilene Rosa dos Santos, por me mostrar o outro lado da matemática, que me inspirou e nunca duvidou de mim.

A todos aqueles que foram esquecidos por um descuido, vocês contribuíram mesmo que involuntariamente, para o resultado final deste trabalho. Muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os otólitos são estruturas calcificadas encontradas no ouvido interno dos peixes, desempenhando um papel fundamental no equilíbrio hidrostático e audição em peixes teleosteos. Essas estruturas oferecem uma riqueza de informações que permitem investigar a dinâmica e a história de vida dos peixes. Nos últimos anos, a análise da forma dos otólitos tem se destacado como uma ferramenta valiosa para discriminar espécies e estuários associados. O contorno dos otólitos, uma representação bidimensional de sua forma, pode ser analisado utilizando métodos como a Análise de Fourier Elíptica (AFE), que se baseia em funções trigonométricas e periódicas chamadas harmônicas, cujas combinações permitem a reconstrução do contorno do otólito. O objetivo desse estudo foi analisar a variação morfométrica dos otólitos de *Caranx latus* capturados no litoral de Pernambuco – Brasil, e comparar a variação ontogenética da forma dos indivíduos juvenis dos cinco estuários da região: Sirinhaém, Santa Cruz, Suape, Rio Formoso e Goiana. Foram coletados 389 indivíduos de *Caranx latus* por meio da pesca artesanal em cada estuário mencionado. Para cada indivíduo, o contorno do otólito foi obtido em coordenadas x e y , os dados foram analisados utilizando o Software R, com os pacotes *momocs* para o cálculo da AFE e *segmented* para o cálculo de componentes principais significativos. Além disso, realizamos a Análise do Discriminante Linear para observar a classificação correta das amostras com base no estuário de origem. Os resultados revelaram diferenças significativas entre os estuários ($p < 0,05$), especialmente entre Suape, Sirinhaém e Santa Cruz. A grande variabilidade na forma está relacionada ao desenvolvimento do *rostrum* e *antirostrum*, o estuário de Suape destacou-se por ter um formato mais alongado, com suas bordas dorsal e ventral achatadas e reduzidas, em relação aos demais. Embora a validação cruzada tenha demonstrado uma baixa acurácia de 38%, indicando uma relação limitada entre a forma dos otólitos e o seu estuário de origem, cada um exibe características morfológicas distintas, relacionadas principalmente a fatores ambientes, incluindo influências de água doce e salgada, bem como os impactos das atividades antrópicas. Assim, a análise da forma dos otólitos emerge como uma ferramenta eficaz não apenas na diferenciação de estuários com características fenotípicas estritamente semelhantes, mas também na identificação de unidades populacionais, o que contribui para uma gestão mais eficiente dos recursos pesqueiros de águas interiores.

Palavras-chaves: Otólitos, Morfometria, Morfologia, Análise Elíptica de Fourier.

ABSTRACT

Otoliths are calcified structures found in the inner ear of fish and play a fundamental role in hydrostatic balance and hearing in teleost fish. These structures offer a wealth of information that allows us to investigate the dynamics and life history of fish. In recent years, the analysis of otolith shape has been highlighted as a valuable tool for discriminating between species and associated estuaries. The contour of otoliths, a two-dimensional representation of their shape, can be analyzed using methods such as Elliptic Fourier Analysis (EFA), which is based on trigonometric and periodic functions called harmonics, the combinations of which allow for the reconstruction of the otolith contour. The aim of this study was to analyze the morphometric variation in the otoliths of *Caranx latus* caught off the coast of Pernambuco - Brazil, and to compare the ontogenetic variation in the shape of juvenile individuals from five estuaries in the region: Sirinhaém, Santa Cruz, Suape, Rio Formoso and Goiana. A total of 389 individuals of *Caranx latus* were collected through artisanal fishing in each estuary. For each individual, the outline of the otolith was obtained in x and y coordinates, and the data was analyzed using the R Software, with the packages *momocs* for calculating the EFA and segmented for calculating significant principal components. In addition, we performed Linear Discriminant Analysis to observe the correct classification of the samples based on the estuary of origin. The results revealed significant differences between the estuaries ($p < 0.05$), especially between Suape, Sirinhaém and Santa Cruz. The great variability in shape is related to the development of the rostrum and antirostrum; the Suape estuary stood out for having a more elongated shape, with its dorsal and ventral edges flattened and reduced, compared to the others. Although cross-validation showed a low accuracy of 38%, indicating a limited relationship between the shape of the otoliths and their estuary of origin, each exhibits distinct morphological characteristics, mainly related to environmental factors, including freshwater and saltwater influences, as well as the impacts of anthropogenic activities. Thus, otolith shape analysis has emerged as an effective tool not only for differentiating estuaries with strictly similar phenotypic characteristics, but also for identifying stocks, which contributes to more efficient management of inland fisheries resources.

Keywords: Otoliths, Morphometry, Morphology, Elliptic Fourier Analysis.

Lista de figuras

Figuras do referencial teórico

- Fig. 1.** Imagens de espécies juvenis (a, 157 mm SL), subadultos (b, 389 mm SL) e adultos (c. 524 mm SL) de *Caranx latus* capturados no litoral de Pernambuco. 13
- Fig. 2.** Esquema ilustrativo do labirinto do ouvido interno de *Poecilia mexicana* destacando suas estruturas e morfologia interna. d, dorsal; la, lateral; r, rostral; L, Lagena; S, Sacculle; U, Utricule. Escala = 1mm. 14
- Fig. 3.** Localização da área investigada no presente estudo (retângulo tracejado), ao longo da costa nordeste do Brasil (imagem fornecida pela A. S. Lira). 19
- Fig. 4.** Locais de amostragem ao longo da costa do estado de Pernambuco (nordeste do Brasil) para estudo. A área de pesca offshore para *Caranx latus* (a) é indicada pelo retângulo tracejado. Os estuários de Goiana (b), Santa Cruz (c), Suape (d), Sirinhaém (e) e Rio Formoso (f), são indicados por retângulos simples. 21
- Fig. 5.** Imagem do otólito *Caranx latus*, antes e após o processamento, para a obtenção do contorno. 22
- Fig. 6.** Gráfico indicando o número de componentes principais significativos em função da variância explicada (%). 26
- Fig. 7.** Representação das contribuições da forma dos contornos dos otólitos para os 3 componentes principais (PCs) (média \pm desvio padrão). 27
- Fig. 8.** Boxplot da comparação dois a dois do teste de Tukey para a PC1. 28
- Fig. 9.** Forma média dos estuários de Santa Cruz de Itapissuma, Sirinhaém e Suape. 29
- Fig. 10.** Boxplot da comparação dois a dois do teste de Tukey para a PC3. 30
- Fig. 11.** Gráfico de dispersão entre as PCs que houve diferença significativa (PC1 vs PC3). 31
- Fig. 12.** Dendograma da distância dos pontos dos estuários a partir do método de mahalanobis para os componentes principais significativos 33

Lista de tabelas

Tabela 1. Medidas de dispersão e posição para o comprimento total (mm) do otólito por estuário.	32
Tabela 2. Classificação correta por Área pela Análise de Discriminante Linear na validação cruzada leave-one-out.	32
Tabela 3. Classificação correta pela Análise de Discriminante Linear na validação cruzada leave-one-out.	33

Apêndice A

APÊNDICE A1. Média da forma do contorno dos otólitos do estuário de Suape.	44
APÊNDICE A2. Resumo das características morfológicas e configurações ambientais dos estuários estudados ao longo da costa nordeste do Brasil. (Medeiros & Kjerfve 1993, Medeiros et al. 2001, Honorato da Silva et al. 2004, Silva et al. 2009, Otsuka et al. 2014, Lima et al. 2015, Gonzalez et al. 2019, Conti et al. 2020).....	44

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1	ESPÉCIE <i>Caranx latus</i>	12
2.2	OTÓLITOS.....	14
2.3	MORFOMETRIA GEOMÉTRICA	15
2.3.1	ANÁLISE DE FOURIER ELÍPTICA	17
3	OBJETIVOS.....	18
3.1	OBJETIVO GERAL	18
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4.	METODOLOGIA	19
4.1	ÁREA DE ESTUDO	19
4.2	DESCRIÇÃO DOS DADOS	20
4.3	IMAGEM E OBTENÇÃO DE CONTORNOS	22
4.4	ANÁLISE DOS DADOS	22
4.4.1	ANÁLISE DE FOURIER ELÍPTICA	22
4.4.2	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS	24
4.4.3	ANÁLISE DE DISCRIMINANTE LINEAR	25
5.	RESULTADOS	26
6.	DISCUSSÃO	33
7.	CONCLUSÃO.....	36
8.	REFERÊNCIAS.....	37
	APÊNDICE A.....	43

1 INTRODUÇÃO

Estudos baseados nas características morfológicas de otólitos tem sido utilizado com sucesso para identificação de espécie, distinção de populações e estoques pesqueiros, especialmente em ambientes marinhos (RASHIDABADI *et al.*, 2020; TUSET *et al.*, 2016). Decorre devido ao otólito possuir uma forma que diferencia de espécie para espécie, tornando-se algo específico, marcada principalmente pelas variações geográficas intraespecífica em decorrência de fatores ambientes (JEMAA *et al.*, 2015; CAMPANA & CASSELMAN, 1993)

Além de ter maior preservação nos sítios arqueológicos e não sofrerem reabsorção, ou seja, é menos variável que outras características existentes nos peixes. Diferentes técnicas têm sido aplicadas para análise da forma dos otólitos (PONTON, 2006). Contudo, grande parte da informação biológica de interesse está contida no formato do otólito e não necessariamente em medições univariadas (CADRIN; FRIEDLAND, 1999).

Neste contexto, uma das técnicas utilizadas nos estudos de discriminação de espécies usando a forma do otólito é a Análise Elíptica de Fourier (AFE), desenvolvida por KUHL & GIARDINA (1982). A série de Fourier descreve as formas (silhuetas) por meio de descritores chamados harmônicos, representando a contribuição relativa da forma empírica de um objeto, seguida do seu alongamento e triangularidade (BIRD; EPPLER; CHECKLEY JR, 1986). Além disso, os harmônicos definem parâmetros de forma, fornecendo, quando combinadas, uma imagem semelhante a real.

Análises de forma de otólitos, realizadas a partir de métodos geométricos, constituem uma abordagem prática e eficiente para determinar e diferenciar estoques pesqueiros (CAMPANA & CASSELMAN, 1993). Enquanto, a utilização dos índices de forma tem a vantagem de apresentar cálculos mais simples, representando o padrão de crescimento dos otólitos (TUSET *et al.*, 2003).

A espécie do *Caranx latus*, popularmente conhecido como Xáreu Olhudo (horse-eye jack), são espécies pelágicas, distribuídas em todo o Oceano Atlântico, em águas tropicais e subtropicais, podendo ser encontradas também em águas temperadas, que formam cardumes junto à costa (LUQUE & ALVES, 2001; HONEBRINK, 2000). Utilizam uma variedade de habitats, incluindo estuários, baías e recifes profundos, mas

são normalmente encontrados em zonas costeiras, incluindo ao largo de ilhas (HOLLAND, WETHERBEE & LOWE, 1996).

Além disso, contribuem de forma significativa nas pescarias comerciais, tornando-se uma grande potência para a cultura da pesca artesanal no Brasil, além de ter importância econômica e grande demanda nos mercados e peixarias do Nordeste (GONZALEZ et al., 2021; PELAGE, 2020).

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo analisar a variação morfométrica dos otólitos de *Caranx latus* capturados no litoral de Pernambuco do Brasil, utilizando a Análise de Coeficiente de Fourier e análises de estatísticas multivariadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

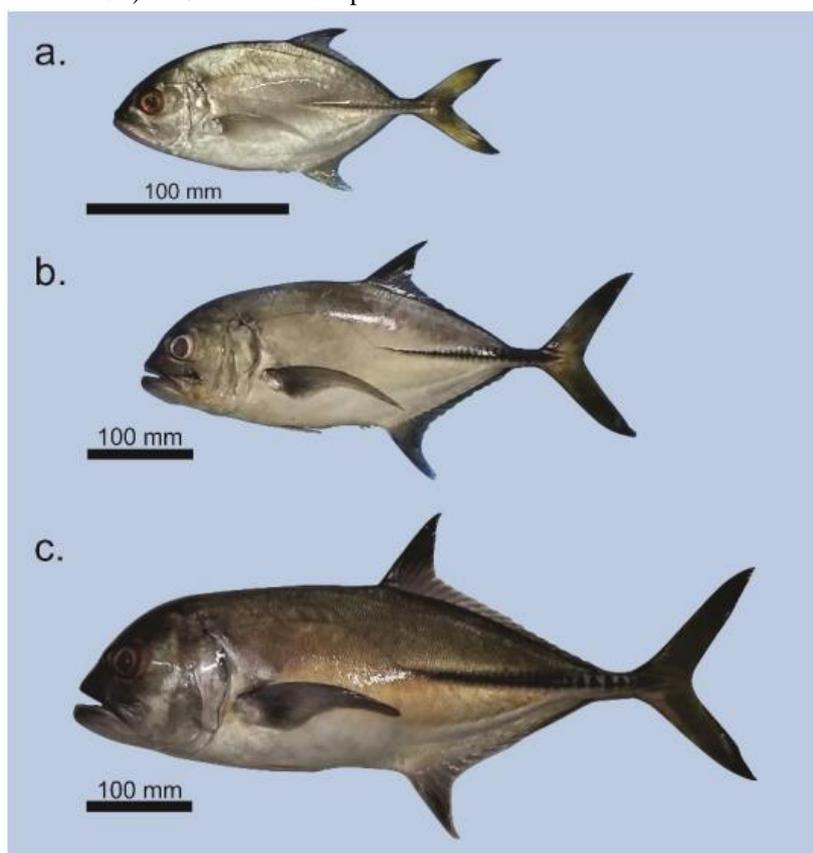
2.1 ESPÉCIE *Caranx latus*

Os peixes marinhos da família Carangidae são espécies pelágicas de águas tropicais e subtropicais, mas também podem ser encontradas em águas temperadas (HONEBRINK, 2000). São animais predadores e alimentam-se basicamente de peixes menores e invertebrados, e quando jovens, se alimentam de crustáceos e zooplâncton (LUQUE & ALVES, 2001).

São espécies bastante frequentes no litoral do estado e apresentam amplitudes de distribuição geográfica que abrange todo o Atlântico ocidental, no estado de Nova Jersey nos EUA até o estado do Rio Grande do Sul, no Brasil (FIGUEIREDO & MENEZES, 1980).

O *Caranx latus*, popularmente conhecido como xaréu olhudo (horse-eye jack, no inglês), é uma espécie de peixe teleósteo, possuindo o dorso azul-escuro, os flancos prateados ou dourados e o ventre amarelado, pode-se observar na Figura 1.

Fig. 1 – Imagens de espécies juvenis (a, 157 mm SL), subadultos (b, 389 mm SL) e adultos (c. 524 mm SL) de *Caranx latus* capturados no litoral de Pernambuco.



Fonte: GONZALEZ *et al.*, 2021.

Espécie muito valorizada e tem sido explorada pela pesca artesanal e esportiva. Tendo uma grande importância econômica e grande demanda nos mercados e peixarias (MENEZES & FIGUEIREDO, 1980), podendo atingir cerca de 100 cm de comprimento. Além de ser fonte de alimentação e renda no Atlântico Sudoeste (GONZALEZ *et al.*, 2021).

No Brasil, tem grande importância na indústria pesqueira, tendo aproximadamente 3.400 toneladas capturados ao longo da costa, entre os anos de 2009 e 2011, através da pesca artesanal (MPA, 2011). No nordeste do Brasil, a espécie costuma ser comercializada a partir de R\$ 15/kg e chegando até os R\$ 20/kg, pois é quando a qualidade da sua carne é considerada melhor, onde a espécie se encontra com 300 mm de SL e 0,5kg de peso (GONZALEZ *et al.*, 2021).

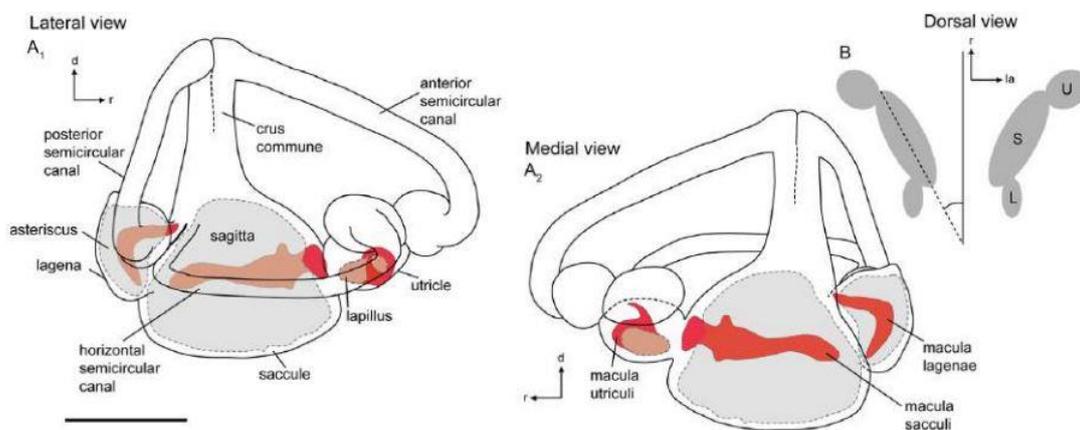
Mesmo com sua importância comercial, a biologia e a dinâmica populacional do *Caranx latus* ainda é desconhecida em diversos lugares. E informações sobre seu crescimento se limita ao peso-crescimento (GONZALEZ *et al.*, 2021).

2.2 OTÓLITOS

Os otólitos são estruturas calcificadas encontradas no ouvido interno dos peixes teleósteos. São constituídas por carbonato de cálcio ($CaCO_3$), (95%, cristalizado principalmente na forma de aragonita), matéria orgânica (3-5%) e elementos químicos (CAMPANA, 1999; 2004), que estão depositados em uma matriz orgânica proteína denominada otolina (semelhante à queratina), os quais não são considerados ossos verdadeiros visto a ausência de osteócitos e osteoclastos (POPPER *et al.*, 2005).

Estas estruturas crescem a partir da deposição de camadas concêntricas de carbonato de cálcio durante o desenvolvimento somático dos peixes e ocorrem em três canais semicirculares e três pares de otólitos (Fig. 2) assim denominados: *lapillus*, *sagittae* e *asteriscus* (BIZERRIL & COSTA, 2001), cada uma está associada ao *sacculus*, *utriculus* e *lagena* (POPPER & LU, 2000; ASSIS, 2000; VASCONCELOS – FILHO *et al.*, 2019). Assim, formando o sistema auditivo e vestibular.

Fig. 2 – Esquema ilustrativo do labirinto do ouvido interno de *Poecilia mexicana* destacando suas estruturas e morfologia interna. d, dorsal; la, lateral; r, rostral; L, Lagena; S, Saccule; U, Utricule. Escala = 1mm.



Fonte: Adaptação Vasconcelos – Filho (2019) & Schulz-Mirbach *et al.* (2011).

O crescimento do otólito é controlado pela mácula, que é um tecido sensorial onde apresenta células ciliadas sensoriais intercaladas por células de sustentação, sendo elas recoberta por uma camada gelatinosa, na qual os otólitos encontram-se mergulhados (OLIVEIRA, 2015). Os estímulos fornecidos a mácula são provocados pelas variações das condições ambientais, como foto período, temperatura e regime alimentar.

A função do otólito está associada à audição e equilíbrio (POPPER & FAY, 1993), permitindo com que o peixe mantenha o equilíbrio corporal no meio e consiga captar

sons, mas também registrar informações sobre a história de vida e seu habitat. Dessa maneira, o otólito funciona como receptor mecânico estimulando o tecido sensorial (POPPER; HÖXTER, 1981). Sendo, a captação de som realizada através da bexiga natatória, que captam vibrações e direciona para o ouvido interno (VASCONCELOS – FILHO *et al.*, 2019).

Os otólitos são considerados como uma espécie de “caixa preta”, armazenando informações ecológicas e biológicas cruciais sobre os peixes teleósteos. Eles desempenham um papel fundamental em uma variedade de estudos, incluindo o crescimento diário, sazonal ou anual, idade, especialmente no contexto do manejo e conservação dos recursos pesqueiros (GREEN *et al.*, 2009).

Os otólitos são elementos essenciais para os pesquisadores devido à sua diversidade e à capacidade de preservação mesmo em ambientes delicados, como sítios arqueológico, nos quais não sofrem reabsorção. Estas estruturas podem apresentar uma grande variedade de formas, refletindo a ampla gama de variações fenotípicas tanto dentro de uma espécie como entre espécies distintas. Desde padrões complexos e contornos irregulares até formas mais simples e circulares, os otólitos fornecem uma riqueza de informações sobre a história e a ecologia das espécies marinhas (KLOKER, 2016; OLIVEIRA, 2015).

2.3 MORFOMETRIA GEOMÉTRICA

A morfometria refere-se ao estudo estatístico das alterações e variações na forma e do tamanho de estruturas, bem como a análise e mensuração de um componente complexo multidimensional conhecido como forma (MORAES, 2003; MONTEIRO & REIS, 1999). Essa abordagem permite a integração de diversos dados obtidos a partir de pontos e contornos com correspondência biológica (marcos anatômicos), além de sua relação com outras variáveis (BOOKSTEIN, 1991), possibilitando a síntese de informações sobre tamanho e conformação.

No qual busca descrever e representar a geometria das formas de maneira precisa, identificando e localizando claramente as regiões onde ocorrem as mudanças e visualizando graficamente essas diferenças na forma (FORNEL, 2005). Essas descrições são fundamentadas em marcos anatômicos, também conhecidos como *landmarks*, que são pontos de referência presentes em cada objeto e que se alinham entre e dentro das

populações analisadas (DRYDEN & MARDIA, 1998). Dessa forma, os *landmarks* representam pontos morfológicos que se supões serem e que se repetem nos objetos de estudo.

É uma área de conhecimento nova, em ascensão, que tem ganhado destaque nos últimos anos e se estabelecido como uma ferramenta crucial em análises taxonômicas e sistemáticas. Suas vantagens em relação á morfometria tradicional são numerosas, e ela tem se mostrado relevante em uma variedade de campos científicos. Por exemplo, a aplicação de pontos homólogos tem sido utilizada para estudar comunidades de peixes (REIS-JUNIOR, VALENTIN *et al.*, 2008; REISS & BONNAN, 2010), para determinar as medidas das diferenças entre as espécies de modo a elaborar diferentes referenciais para comparações (PERES-NETO, 1995).

Por essas razões, a morfometria geométrica se destaca como uma técnica que oferece a capacidade de diferenciar espécies com uma alta confiabilidade, e tudo isso em tempo reduzido e com custos mais baixos (CALLE *et al.*, 2008). Resultando em uma melhoria significativa na qualidade das informações biológicas obtidas de estruturas como os otólitos, os quais exibem variações nos contornos e na posição relativa dos pontos de referência anatômicos (MONTEIRO *et al.*, 2004; 2005).

A morfometria de otólitos é uma ferramenta quantitativa que possibilita a análise da forma para compreender como diversos processo biológico, como o desenvolvimento ontogenético, a maturidade e a adaptação a fatores geográficos, influenciam as mudanças nos otólitos dos indivíduos ou em parte deles (ZELDITCH *et al.*, 2012; ALABAT, *et al.*, 2019).

Ela tem sido empregada em estudos que investigam a diferenciação de estoques pesqueiros por meio da variação de forma nos otólitos (TRACEY *et al.*, 2006). Por se tratar de uma abordagem prática e eficaz para determinar e distinguir os estoques, a morfometria de otólitos é essencial na implementação de estratégias de manejo de espécies e ecossistemas (MONTEIRO & REIS, 1999; 2005; PONTON, 2006; CAMPANA & CASSELMAN, 1993).

Assim, o progresso de novas técnicas morfométricas está alinhada com o desenvolvimento dos métodos de identificação de estoques pesqueiros, complementando abordagens genéticas e ambientais na discriminação desses estoques (CADRIN, 2000).

Isso torna o estudo morfométrico dos otólitos uma alternativa atrativa para aplicação no gerenciamento de estoques pesqueiros (MONTEIRO *et al.*, 2004).

2.3.1 ANÁLISE DE FOURIER ELÍPTICA

A Análise de Fourier Elíptica (AFE) baseia-se em funções trigonométricas e periódicas chamadas harmônicas, cujas combinações permitem a reconstrução do contorno do otólito, permitindo uma descrição quantitativa e comparação de suas formas (FARIAS *et al.*, 2009). Desenvolvida por Kuhl & Giardina (1982), esta técnica apresenta funções paramétricas que serão detalhadas na metodologia deste estudo.

A AFE descreve as formas (silhuetas) por meio de descritores das harmônicas que refletem a contribuição relativa da forma empírica de um objeto, incluindo seu alongamento e triangularidade (BIRD *et al.*, 1986). Esses harmônicos também definem parâmetros de forma, gerando uma representação visual próxima à realidade quando combinadas.

Estudos que combinaram AFE com índices de forma obtiveram resultados mais precisos e completos na descrição da forma dos otólitos (CAMPANA; CASSELMAN, 1993; DUARTE-NETO *et al.*, 2008; STRANSKY; MACLELLAN, 2005). Enquanto a AFE oferece uma resposta rápida e objetiva, o uso de índices de forma proporciona cálculos mais simples, representando o padrão de crescimento dos otólitos (TUSET *et al.*, 2003)

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a variação morfométrica dos otólitos de *Caranx latus* capturados no litoral de Pernambuco do Brasil.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

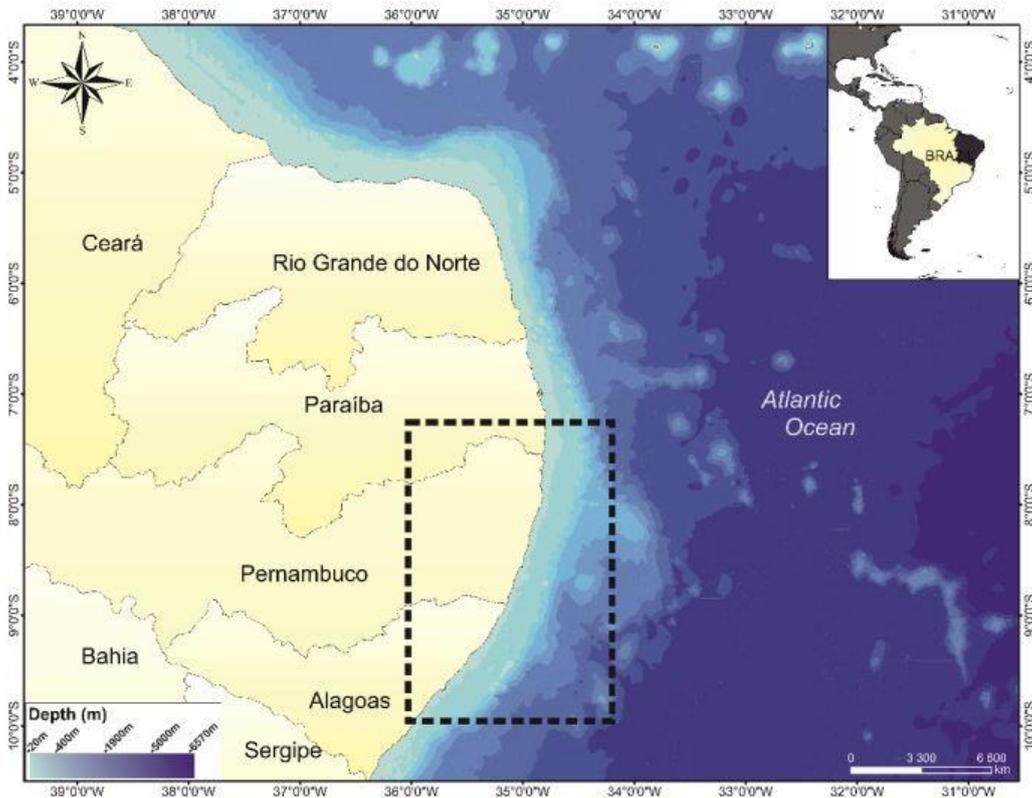
- 3.2.1 Comparar os padrões de forma dos indivíduos juvenis capturados em cinco diferentes estuários;
- 3.2.2 Analisar a variação ontogenética da forma dos indivíduos dos estuários.

4. METODOLOGIA

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido ao longo da costa do nordeste do Brasil, especificamente no estado de Pernambuco (Fig.3). A região do Nordeste é influenciada principalmente pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos Oceanos Pacífico e Atlântico, caracterizando-se como clima subtropical, com temperaturas variando de 18 a 32 °C ao longo do ano (MARTINS & JÚNIOR, 2017, CPRH 2003, 2003A, DOMINGUES *et al.*, 2017).

Fig. 3 – Localização da área investigada no presente estudo (retângulo tracejado), ao longo da costa nordeste do Brasil (imagem fornecida pela A. S. Lira).



Fonte: GONZALEZ *et al.*, 2021.

A zona costeira do Estado de Pernambuco se estende desde o município de Goiana, ao norte, na divisa com o Estado da Paraíba, até o município de São José da Coroa Grande, ao sul, na fronteira com o estado de Alagoas. Correspondendo a uma faixa territorial de 187 km de extensão e engloba 21 municípios, representando o principal

aglomerado populacional do estado, onde reside aproximadamente 44% de sua população (CPRH, 2001).

A plataforma continental desta região tem cerca de 35 km de largura e uma profundidade máxima de 60 m próximo à sua borda (VITAL *et al.*, 2010, DOMINGUES *et al.*, 2017). Um dos principais fenômenos físicos responsáveis pela ocorrência de chuvas na região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que exerce influência direta sobre a estação chuvosa no norte do Nordeste Brasileiro (NEB). As precipitações ao longo da costa ocorrem predominantemente no final do outono e inverno, entre maio a agosto, enquanto o período mais seco se estende do final da primavera ao início do verão, entre outubro e dezembro (HASTENRATH & HELLER, 1977).

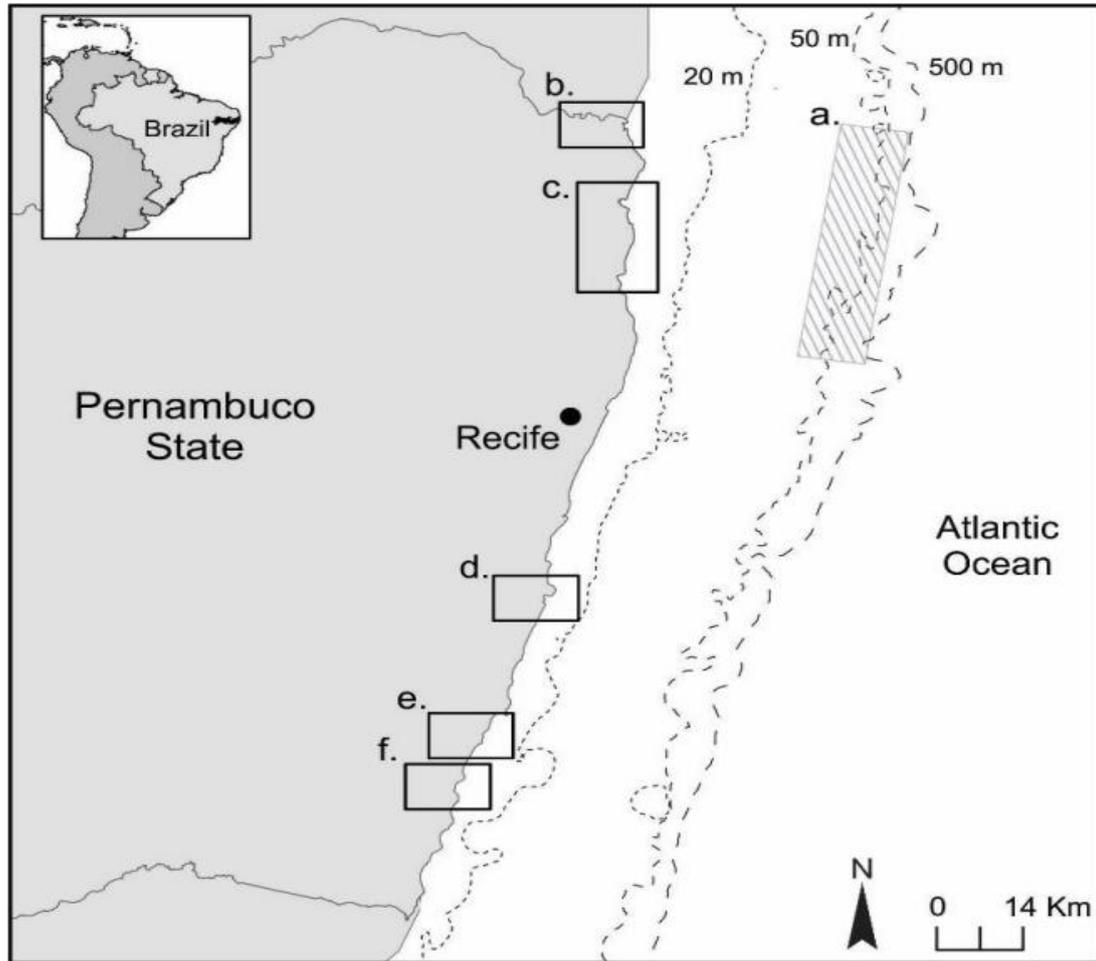
A presença de recifes de coral em franjas na região externa e na encosta superior da prateleira levou ao reconhecimento desta área como uma Área Marinha Significativa do ponto de vista ecológico ou biologicamente (CDB 2014). Essa configuração proporciona habitats favoráveis para diversas espécies de peixes residentes e migratórios (CDB 2014), incluindo a espécie *Caranx latus*.

4.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS

A base de dados utilizada para a análise do contorno de otólitos de *Caranx latus*, foi disponibilizada pelo Dr. Júlio Guazzelli Gonzalez e Dr. Thierry Frédou. Os exemplares de *Caranx latus* da plataforma continental foram obtidos a partir de desembarques de pescarias artesanais (GONZALEZ *et al.*, 2021), totalizando 389 indivíduos capturados. Todos os espécimes foram capturados através da pesca artesanal com linha manual, mensalmente, entre agosto de 2017 e agosto de 2019, tanto em habitats costeiras, como estuários, quanto nos recifes **offshore**, localizados a 30 km da linha costeira.

Os indivíduos foram capturados em cinco estuários costeiros locais (Fig. 4), com a seguinte distribuição: 16 em Goiana, 94 em Santa Cruz de Itapissuma, 119 em Suape, 138 em Sirinhaém e 22 em Rio Formoso.

Fig. 4 – Locais de amostragem ao longo da costa do estado de Pernambuco (nordeste do Brasil) para estudo. A área de pesca **offshore** para *Caranx latus* (a) é indicada pelo retângulo tracejado. Os estuários de Goiana (b), Santa Cruz (c), Suape (d), Sirinhaém (e) e Rio Formoso (f), são indicados por retângulos simples.



Fonte: GONZALEZ *et al.*, 2021.

Todos os indivíduos foram identificados de acordo com a literatura especializada (FIGUEIREDO & MENEZES, 1980; SMITH-VANIZ, 2002), medidos quanto ao comprimento padrão (SL, em mm), pesados (peso eviscerado, EW, em g) e armazenados congelados para análise posterior.

A maioria dos peixes obtidos da pesca **offshore** foram eviscerados a bordo, enquanto os provenientes dos estuários estavam em estágio imaturo, impedindo a inclusão do efeito do sexo nas análises. De cada indivíduo, foram extraídos os otólitos *sagittae* esquerdo e direito de cada indivíduo.

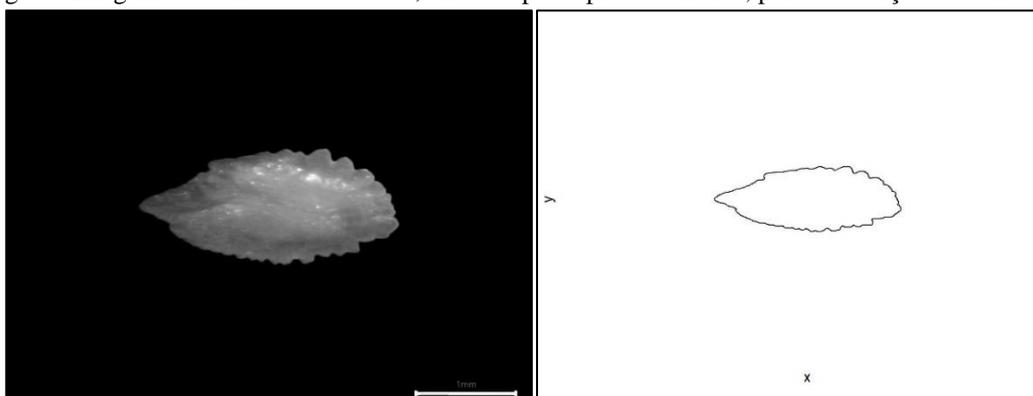
4.3 IMAGEM E OBTENÇÃO DE CONTORNOS

Os otólitos foram orientados horizontalmente com o *rostrum* e *antirostrum* para a direita e com *sulcus acusticus* para cima, sendo fotografados com auxílio de lupa estereomicroscópio do modelo Opton, com câmera acoplada modelo U SERIES CMOS UCMOS03, com luz refletida sobre fundo preto e escala em micrômetros.

A análise dos contornos baseou-se em uma digitalização da silhueta de um objeto, representada como uma sequência de coordenadas (x, y), manipuladas matematicamente e ajustadas a uma equação derivada da Análise de Fourier Elíptica (AFE) (AVILA, 2014).

As imagens dos otólitos foram binarizadas para extração automática dos contornos através do *software R version 4.1.1* (R Core Team, 2021). O contorno foi extraído em coordenadas (x, y) ao longo de todo otólito, utilizando um ChainCode, como ilustrado na Fig. 5.

Fig. 5 – Imagem do otólito *Caranx latus*, antes e após o processamento, para a obtenção do contorno.



4.4 ANÁLISE DOS DADOS

4.4.1 ANÁLISE DE FOURIER ELÍPTICA

A Análise de Fourier Elíptica (AFE) permite descrever e comparar formas de otólitos quantitativamente. Este método realiza um ajuste de funções trigonométricas (senos e cossenos), decompondo as variações das coordenadas x e y separadamente, como funções paramétricas da distância ao longo do contorno (LESTREL, 1994; KUHL & GIARDINA, 1982).

Diante disso, a AFE foi aplicada na matriz de coordenadas x e y dos contornos dos otólitos, através do R. 4.1.1 (R Core Team, 2021), com o pacote *momocs*

(BONHOMME et al., 2014). No qual foi utilizado as funções paramétricas (1) e (2) propostas por KUHLE & GIARDINA (1982), em que o contorno é representado como uma sequência de pontos (p) ordenados, e as distâncias entre os pontos são lineares, com variação de 0 a 2π .

A função paramétrica da Análise de Fourier Elíptica da sequência de coordenadas x_p e y_p foi dada por:

$$x_p = A_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cos nt + \sum_{n=1}^N b_n \sin nt \quad (1)$$

$$y_p = C_0 + \sum_{n=1}^N c_n \cos nt + \sum_{n=1}^N d_n \sin nt \quad (2)$$

Sendo a_n , b_n , c_n e d_n os coeficientes da harmônica n e N o número máximo de harmônicas. (LESTREL, 1997).

Onde,

$$a_n = \frac{1}{n^2\pi} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} (\cos nt_p - \cos nt_{p-1}) \quad (3)$$

e

$$b_n = \frac{1}{n^2\pi} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} (\sin nt_p - \sin nt_{p-1}) \quad (4)$$

Sendo K o número total de pontos do polígono t_p a distância entre esses pontos p e $p-1$ e x_p e y_p as projeções das distâncias. Os coeficientes c_n e d_n para as coordenadas Y , foram calculadas da mesma forma. Sabendo que as constantes B_0 e D_0 são nulas, calculamos as constantes A_0 e C_0 , da seguinte maneira:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{2\Delta t_p} [t_p^2 - t_{p-1}^2] + \alpha_p [t_p - t_{p-1}] \quad (5)$$

e

$$C_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^K \frac{\Delta x_p}{2\Delta t_p} [t_p^2 - t_{p-1}^2] + \beta_p [t_p - t_{p-1}] \quad (6)$$

No qual, os termos α_p e β_p das constantes acima, são calculados da seguinte forma:

$$\alpha_p = \sum_{j=1}^{p-1} \Delta x_n - \left[\frac{\Delta x_p}{\Delta t_p} \sum_{j=1}^{p-1} \Delta t_j \right], \quad (7)$$

e

$$\beta_p = \sum_{j=1}^{p-1} \Delta y_n - \left[\frac{\Delta y_p}{\Delta t_p} \sum_{j=1}^{p-1} \Delta t_j \right]. \quad (8)$$

Onde $\alpha_1 = \beta_1 = 0$.

Para tornar os coeficientes invariantes ao tamanho, rotação e ponto final, é necessário o alinhamento baseado no eixo maior do primeiro harmônico, então utilizou – se os três primeiros coeficientes da primeira harmônica para a normalização (KUHLE & GIARDINA, 1982, DUARTE-NETO et al., 2008). Como não tem uma regra para a utilização de quantas harmônicas, optou – se por 20 harmônicas para o cálculo da AFE, sabendo que cada harmônica tem 4 coeficientes, consequentemente obtivemos 80 Coeficientes de Fourier.

4.4.2 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Com o grande número de variáveis produzidas e com o objetivo de manter o poder das harmônicas na forma dos otólitos, foi realizada a Análise de Componentes Principais ou *Principal Components Analysis* (PCA), utilizando matrizes de variância-covariância, o que reduz a dimensionalidade, e novas variáveis derivadas são criados.

A PCA tem como essência procurar uma base vetorial W que maximize a orientação na direção da máxima variância das amostras, como pode ser observado abaixo:

$$W_{\text{opt}} = \arg \max |W_{\text{PCA}}^T \Sigma W_{\text{PCA}}|,$$

Onde W_{PCA} são os autovetores da matriz de covariância e Σ do conjunto de amostras.

Para o cálculo do número de componentes principais (CPs) significativos foi utilizado o método “breakpoint”, através do pacote “segmented” (MUGGEO, 2008). No qual foi aplicada na matriz de coeficientes de Fourier.

Em seguida, foi aplicada a Análise Multivariada de Variância (MANOVA) para identificar se houve diferença significativa na PCA, caso exista uma diferença, aplicamos a Análise de Variância (ANOVA), para identificar quais CPs divergiram e comparar as variâncias entre as medianas (ou médias) de cada grupo. Por fim, utilizamos o Teste de Tukey, para relacionar cada área. Para todas as estatísticas foi utilizado a significância de 5%.

4.4.3 ANÁLISE DE DISCRIMINANTE LINEAR

A Análise de Discriminante Linear ou *Linear Discriminant Analysis* (LDA) é uma técnica de estatística multivariada supervisionada, que maximiza a separação entre classes e minimiza o espalhamento dentro das classes. Sendo assim, é necessário que os dados já estejam previamente agrupados em c classes, para a sua aplicação.

A ideia básica da LDA é encontrar uma base vetorial W_{LDA} que maximize a razão entre o determinante da matriz inter-classe S_b e matriz intra-classe S_w , assim

$$\text{Critério_Fisher} = \max \left| \frac{S_b}{S_w} \right| .$$

Portanto, a determinação de uma base vetorial W_{opt} que maximize o critério de Fisher pode ser resolvida como um problema de autovetores e autovalores e pode ser determinada conforme a equação a seguir:

$$(S_w^{-1} S_b) \Phi = \Lambda \Phi,$$

onde Φ é a matriz de autovetores e Λ a matriz de autovalores de $S_w^{-1} S_b$.

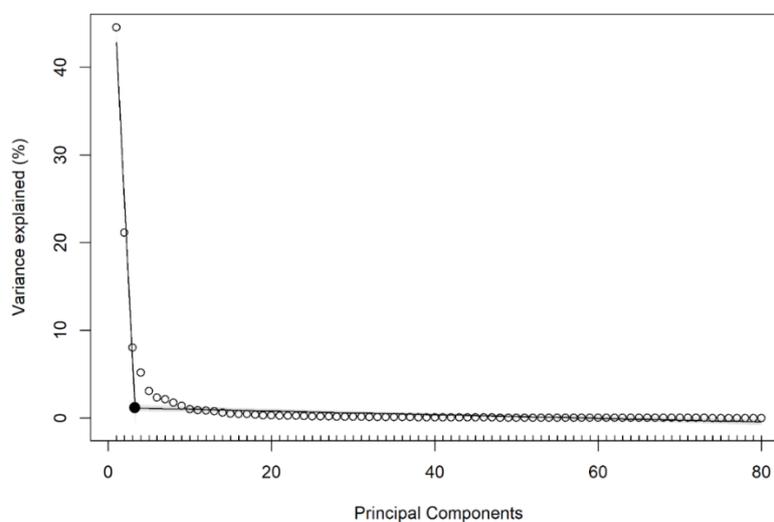
Assim, aplicamos a LDA na matriz de componentes principais, com o propósito de reduzir e verificar se as observações se relacionaram com os grupos para os quais eles foram alocados.

Por fim, utilizamos o método da Distância de Mahalanobis para investigar a dissimilaridade entre os estuários. Este método é uma abordagem de classificação supervisionada, com semelhanças ao classificador de Máxima Verossimilhança, operando sob a hipótese de uma normalidade dos dados utilizados. É importante ressaltar que esse método pressupõe que todas as covariâncias das classes são iguais, sendo a diferenciação refletida apenas nos vetores de média.

5. RESULTADOS

A variação da forma do contorno dos otólitos foi descrita pelos três primeiros componentes principais, os quais acumularam um total de 73.69% da variação explicativa Fig .6, uma proporção significativa de acordo com o modelo de break point.

Fig. 6 – Gráfico indicando o número de componentes principais significativos em função da variância explicada (%).



O primeiro componente principal (PC1) explicou 44.54 % da variabilidade na forma (Fig. 7), onde os valores positivos foram associados a uma borda dorsal mais achatada, uma região anterior mais pontiaguda, não sendo visível a *incisura ostial*, enquanto a região posterior mais arredondada, resultando em uma forma elíptica.

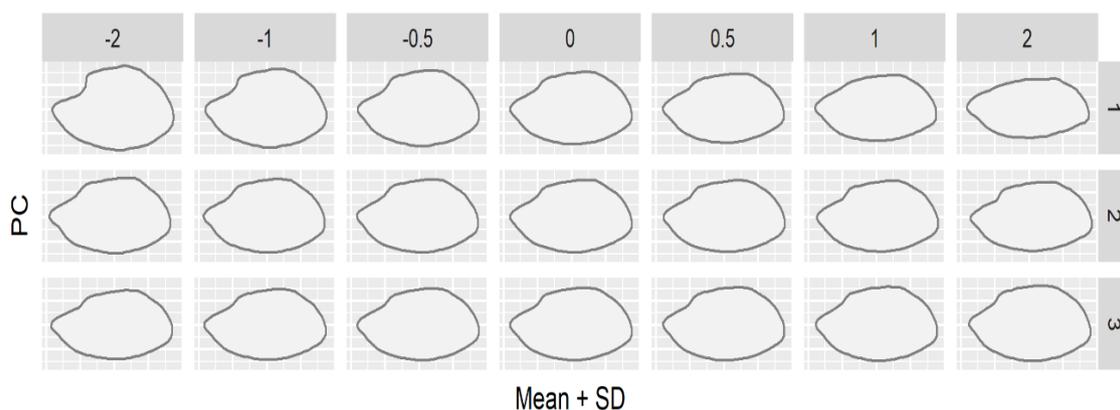
Por outro lado, nos valores negativos, todas as partes que compõem o otólito puderam ser identificadas: a borda dorsal estava mais aumentada e arredondada, a borda

ventral arredondada e lisa, com *rostrum* e *antirostrum* presentes, assim como a *incisura ostial*. Além disso, a região anterior pontiaguda, enquanto a posterior mais arredondada.

No segundo componente (PC2), que representou 21.13% da variação da forma, observou-se uma correlação positiva com a borda dorsal achatada, um *rostrum* mais arredondado e *antirostrum* presentes, assim como a presença da *incisura ostial*. Por outro lado, nos valores negativos, o *rostrum* é mais pontiagudo, a borda dorsal é dentilhada e é perceptível a *incisura ostial* torna-se perceptível.

No terceiro componente (PC3), que acumulou um total de 8.03 % da variabilidade da forma, observa-se que nos valores positivos a borda dorsal é achatada e apresenta uma *incisura* em sua forma, a região anterior é pontiaguda, enquanto a posterior é mais arredondada. Por outro lado, nos valores negativos, o *rostrum* é mais arredondado e há presença da *incisura ostial*, resultando em um otólito mais alongado.

Fig. 7 – Representação das contribuições da forma dos contornos dos otólitos para os 3 componentes principais (PCs) (média ± desvio padrão).

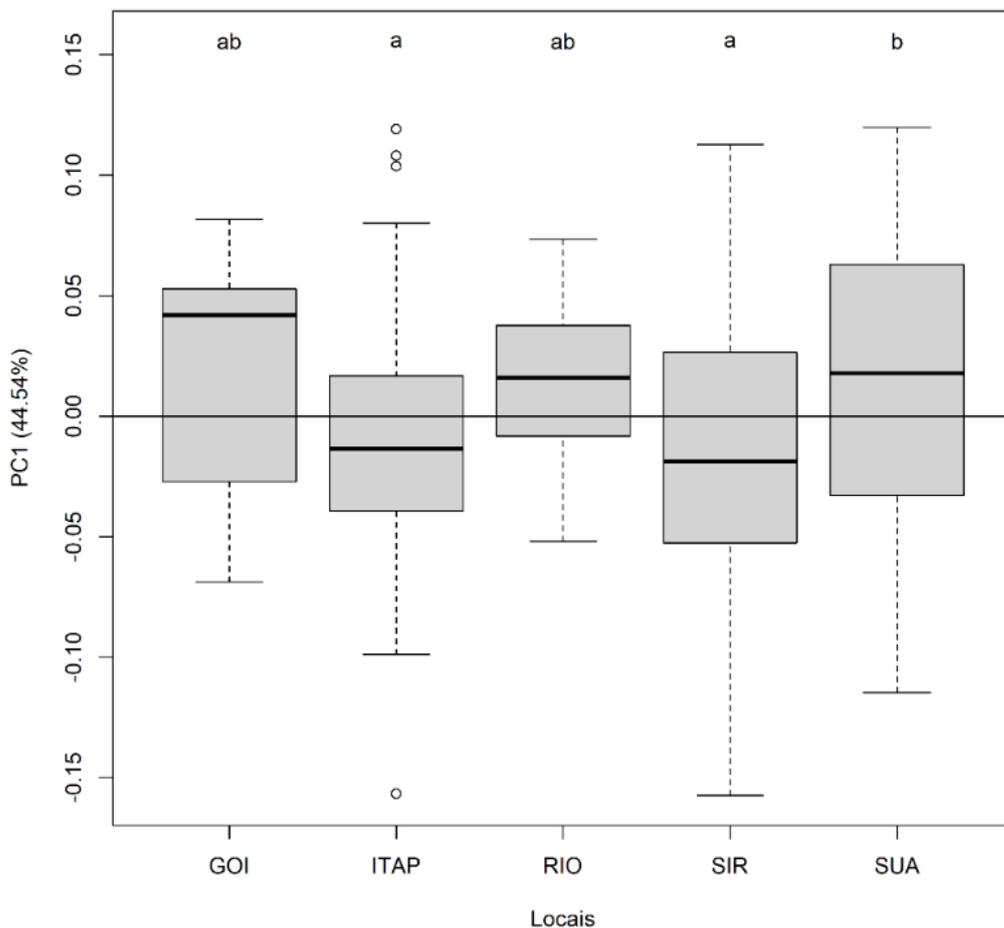


Ao aplicar a Análise Multivariada de Variância (MANOVA) com o teste T^2 de Hotelling-Lawley, observamos uma diferença significativa entre os componentes principais (PCs), com p-valor de 0.0002411.

Em seguida foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), na qual identificamos que, entre os três componentes principais, o PC1 e o PC3 apresentaram uma diferença significativa em relação à forma do otólito, com p-valor inferior a 5%.

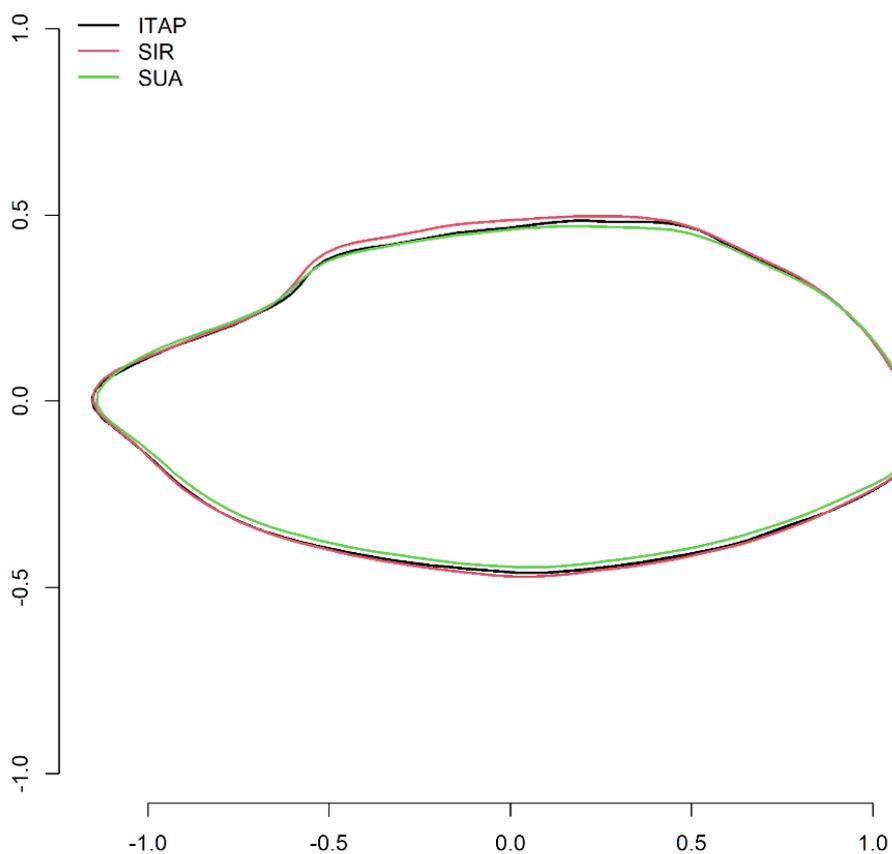
Após a análise dos resultados, foi conduzido um teste *post hoc* (comparação de pares), utilizando o Teste de Tukey. Os resultados para o PC1 estão representado na Fig.8.

Fig. 8 – Boxplot da comparação dois a dois do teste de Tukey para a PC1.



Observa-se que, na comparação da PC1, o único estuário que exibe uma distribuição assimétrica em torno da mediana é o de Goiana, que também está presente na parte positiva, juntamente com Rio Formoso e Suape. Por outro lado, Santa Cruz e Sirinhaém estão distribuídos simetricamente na parte negativa. Além disso, o estuário de Suape divergiu (p -valor $< 0,05$) em relação a Sirinhaém e Santa Cruz de Itapissuma. Onde a forma média do otólito de Suape apresenta uma borda dorsal e ventral menor e mais achatada em comparação aos outros dois estuários, podemos ver na Fig. 9. Mas também, possui sua região anterior mais arredondada, enquanto a região anterior de Sirinhaém e Itapissuma é pontiaguda e seus *antirostrum* são mais evidentes.

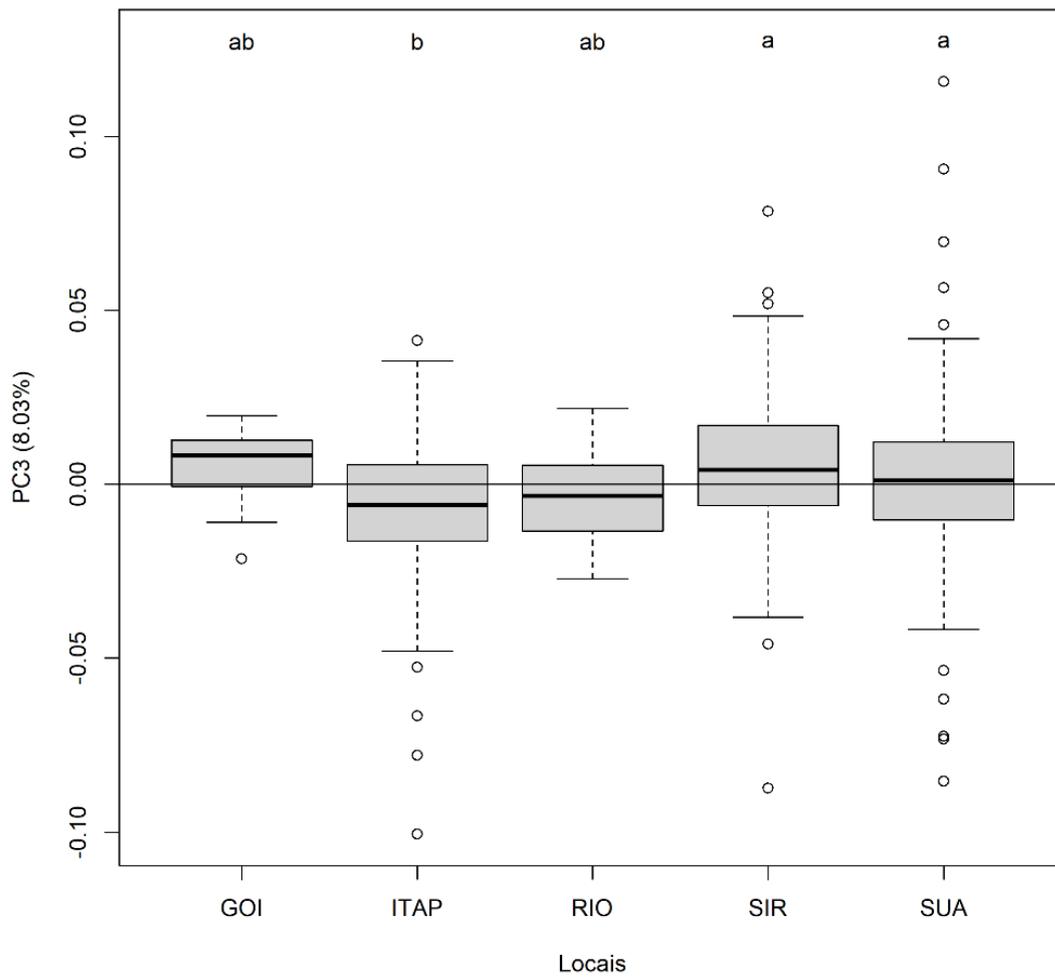
Fig. 9 – Forma média dos estuários de Santa Cruz de Itapissuma, Sirinhaém e Suape.



Além de que, Sirinhaém apresenta uma forma mais regular, com a região anterior e posterior arredondadas, tanto a borda dorsal quanto a ventral são achatadas e sem rugosidade. Por outro lado, Itapissuma se destaca por ter a borda dorsal quanto a ventral maiores que os outros dois.

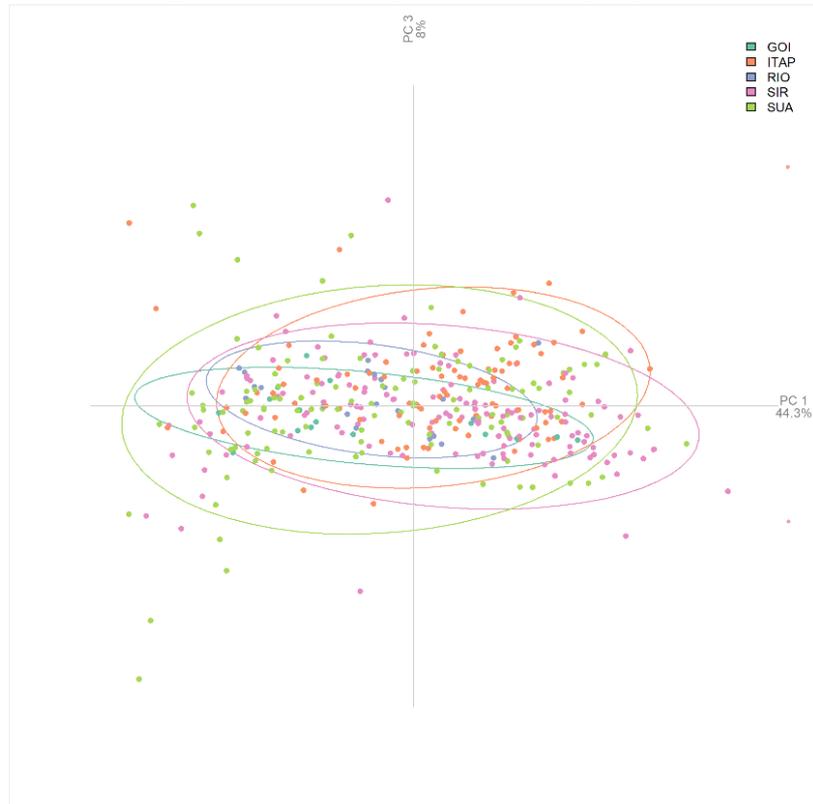
De outra perspectiva, na análise do PC3 (Fig. 10), o estuário de Santa Cruz destacou-se por apresentar diferença (p -valor $< 0,05$) em comparação aos estuários de Sirinhaém e Suape. Todos os estuários exibem simetria em relação a mediana, exceto o de Goiana. Isso pode ser atribuído ao fato de ser o estuário com amostras menores em comparação aos demais e por possuir uma maior homogeneidade.

Fig. 10 – Boxplot da comparação dois a dois do teste de Tukey para a PC3.



Os diagramas de dispersão dos componentes que apresentaram diferença significativa (PC1 e PC3), não evidenciaram claramente essas discrepâncias entre os estuários, podemos observar na Fig. 11. Embora reconheçamos a importância desses componentes para a contribuição de informações.

Fig. 11 - Gráfico de dispersão entre as PCs que houve diferença significativa (PC1 vs PC3).



A grande variabilidade ao longo do primeiro componente principal indica que o contorno do otólito varia no desenvolvimento do *rostrum* e *antirostrum*. Os valores médios dos coeficientes de Fourier determinaram uma forma fenotípica para cada espécie, possibilitando sua diferenciação e classificação.

A forma do otólito que apresentou uma maior variabilidade estatística foi a do estuário de Suape (Tabela 1). Este estuário demonstrou a maior amplitude da forma, atingindo 17.4 mm em relação a seu comprimento total, além de registrar a maior média, mediana e desvio padrão (SD). Destaca-se por ter um otólito mais alongado, com um comprimento máximo de 26.8 mm e o erro muito próximo de zero.

Tabela 1– Medidas de dispersão e posição para o comprimento total (mm) do otólito por estuário.

Estuários	Nº	Mínimo	Média	Mediana	SD	Máximo	Amplitude
Goiana	16	7	10.41	11.05	3.01	16.5	9.5
Itapissuma	94	6.4	12.57	12	2.81	20.8	14.4
Rio Formoso	22	10.2	14	13.4	1.9	17.7	7.5
Sirinhaém	138	4.3	9.79	8.5	3.58	21	16.7
Suape	119	9.4	16.86	17	3.65	26.8	17.4

O estuário com a menor amplitude foi o de Rio Formoso, indicando uma maior homogeneidade em seus dados em relação aos demais estuários, registrando também o menor desvio padrão. Sirinhaém de destaca por ter o menor comprimento.

Ao aplicar a Análise de Discriminante Linear (LDA) com o método de validação cruzada leave-one-out, constatou-se uma baixa acurácia geral de classificação, com apenas 38.3% de classificações corretas. Os níveis de classificação correta para os estuários de Sirinhaém, Suape, Itapissuma, Goiana e Rio formoso foram de 48%, 38%, 35%, 25% e 4.5% respectivamente (Tabela 2 e Tabela 3).

Tabela 2. Classificação correta por Área pela Análise de Discriminante Linear na validação cruzada leave-one-out.

VALIDAÇÃO CRUZADA LEAVE-ONE-OUT (ÁREA)					
	GOI	ITAP	RIO	SIR	SUA
GOI	4	1	0	5	6
ITAP	3	33	6	24	28
RIO	2	5	1	4	10
SIR	2	25	5	66	40
SUA	7	27	7	34	44

Tabela 3. Classificação correta pela Análise de Discriminante Linear na validação cruzada leave-one-out.

VALIDAÇÃO CRUZADA LEAVE-ONE-OUT		
Estuários	Observações corretamente classificação\ Observações totais	% Observações corretamente classificadas
Sirinhaém	66/138	47.8%
Suape	45/119	37.8%
Itapissuma	33/94	35.1%
Goiana	4/16	25%
Rio Formoso	1/22	4.5%

Ao realizar o método de Mahalanobis, geramos um dendograma (Fig. 12) mostrando as distâncias entre os pontos dos estuários. Dois grupos distintos foram identificados, um com menor distância e outro com maior distância entre eles. O grupo de menor distância é composto pelos estuários de Goiana, Rio Formoso e Suape. Por outro lado, grupo de maior distância é composto pelos estuários de Santa Cruz e Sirinhaém.

Fig. 12 - Dendograma da distância dos pontos dos estuários a partir do método de mahalanobis para os componentes principais significativos.

6. DISCUSSÃO

A morfologia dos otólitos é influenciada por uma variedade de fatores, muitos dos quais são complexos de interpretar. Ao longo do ciclo de vida dos peixes, os otólitos não apenas crescem, mas também são afetados por mudanças ontogenéticas e por gradientes ambientais (SCHULZ-MIRBACH *et al.*, 2019).

A variação mais proeminente no contorno do otólito está relacionada à elipticidade, como evidenciado no PC1. Os indivíduos do estuário de Suape se destacaram como os principais contribuintes para essa forma, exibindo um padrão de contorno distinto em comparação com os estuários de Santa Cruz de Itapissuma e Sirinhaém. A forma média do otólito de Suape é caracterizada por apresentar bordas dorsal e ventral mais reduzidas e achatadas em comparação com as de Santa Cruz de Itapissuma e Sirinhaém

Além disso, a região anterior do otólito em Suape é mais arredondada, enquanto em Sirinhaém e Itapissuma é mais pontiaguda, com *antirostrum* mais proeminentes. Observou-se diferenças ontogenéticas na borda e no *rostrum* em Suape, resultando em um formato mais elíptico do otólito. Conforme o desenvolvimento ontogenético ocorre, ocorre um crescimento na borda e mudanças no *rostrum*, em consonância com o tamanho.

Foi possível analisar a silhueta do otólito dos indivíduos e também descrever as características morfológicas dos estuários, destacando diferenças fundamentais no formato, nas bordas dorsal e ventral, bem como o desenvolvimento do *rostrum* e *antirostrum*.

Utilizando a distância de Mahalanobis, conseguimos determinar a similaridade entre os dois grupos formados. Observamos que Suape apresenta uma variabilidade maior em relação a Goiana e Rio Formoso, os quais estão localizados nas extremidades dos estuários, tanto ao norte quanto ao sul do Nordeste. Essa disparidade ocorre devido ao fato de que ambos estuários apresentam afluentes mais significativos e são fortemente influenciados pelo ambiente de água doce, especialmente Rio Formoso e Goiana (SILVA *et al.* 2009).

Rio formoso exibe um padrão mais homogêneo, enquanto Goiana é o estuário mais preservado, com manguezais significativos. Contudo, também sofrem influências marítimas, especialmente durante as marés altas, quando a água salgada do oceano penetra na área estuarina. Além disso, Suape possui uma conexão mais restrita com o mar, resultando em um sistema eurihalino (SILVA *et al.*, 2019).

Isso significa que suporta uma ampla faixa de variação de salinidade, permitindo a coexistência de organismos tanto de água doce quanto de água salgada, como evidenciado na tabela suplementar (Apêndice A2.). A mistura de água doce e água salgada caracteriza a dinâmica e a biodiversidade dos estuários, onde durante as marés altas, a água salgada do oceano penetra no estuário, enquanto durante as marés baixas, a água doce dos rios tem maior influência.

Além do estresse natural, inerente ao próprio ambiente estuarino, alguns efeitos negativos sobre os estuários são causados pelas atividades antrópicas (WHITFIELD e ELLIOTT, 2002; EDDY, 2005; VIANA e FRÉDOU, 2014). Nos estuários de Santa Cruz de Itapissuma e Sirinhaém, esses impactos são evidentes devido ao crescimento urbano e a expansão industrial ao longo das áreas costeiras. Como por exemplo, a presença de

usinas de cana-de-açúcar em Sirinhaém e a atividade industrial química ao longo do Rio Botafogo, além da urbanização e desmatamento de manguezais em Santa Cruz.

Isso resulta em poluição por esgotos, resíduos sólidos e químicos, degradação de habitats naturais, desmatamentos e poluição da água. Essas atividades têm um impacto direto sobre as espécies marinhas locais e, conseqüentemente, influenciam significativamente na forma do otólito (CAVALCANTI, 2003; LOPES *et al.*, 2018).

Avigliano *et al.*, 2012, observaram mudanças da forma dos otólitos em função da salinidade e condutividade elétrica, onde otólitos que vivem em habitats com altas taxas de salinidade. Outras pesquisas que investigaram a morfologia dos otólitos conseguiram distinguir entre espécies congêneres tanto em ambientes marinhos quanto de água doce. Por exemplo, identificaram diferenças no formato dos otólitos entre três espécies simpáticas do gênero *Astyanax*, encontradas em riachos da Mata Atlântica na Argentina (AVIAGLIANO *et al.*, 2018). Esses achados corroboram a eficácia da análise morfológica dos otólitos como uma ferramenta natural para a identificação de espécies de peixes, independentemente do ambiente em que habitam.

Apesar da proximidade geográfica dos cinco estuários costeiros locais, cada estuário exibe indivíduos com características morfológicas distintas, influenciadas principalmente por fatores genéticos, filogenéticos e ambientais específicos de cada localidade. (CAMPANA, 2005; MONTEIRO *et al.*, 2005; VIGNON & MORAT, 2010; ASSIS, 2000).

No geral, a Análise Elíptica de Fourier é reconhecida como uma abordagem mais objetiva e poderosa para capturar toda a gama de variações de forma e as diferenças individuais na silhueta do otólito (MÉRIGOT; LETOURNEUR; LECOMTE-FINIGER, 2007). Além disso, o presente estudo evidenciou que os descritores de Fourier aumentaram significativamente a capacidade de detecção de diferenças entre os estuários.

Contudo, a interpretação biológica é mais complexa do que as técnicas tradicionais. Utilizou-se a análise de componentes principais dos coeficientes de Fourier, como uma ferramenta eficaz para estudar e descrever formas de contorno em otólitos (CAMPANA & CASSELMAN, 1993; CADRIN & FRIEDLAND, 1999, DUARTE-NETO *et al.*, 2018). Essa abordagem permitiu refletir, nas estatísticas multivariadas, a dispersão e a diferenciação dos estuários em diferentes quadrantes, revelando

similaridades com os resultados da Análise Discriminante Linear (LDA) indicando uma relação limitada entre a forma dos otólitos e o seu estuário de origem.

Esses resultados possuem implicações significativas para o manejo de recursos e ecossistemas no nordeste do Brasil, destacando a necessidade de comparações sistemáticas entre locais ao avaliar a ecologia dos peixes e a partição de recursos em sistemas estuarinos. Embora nossos dados provenham de uma única fonte, os otólitos, eles não foram analisados sob uma única perspectiva. A descrição dos estuários revela concordância com a filogenia atual de alguns trabalhos.

7. CONCLUSÃO

Todas as análises conduzidas neste estudo utilizando a morfometria geométrica alcançaram com sucesso os objetivos propostos. As análises morfológicas revelaram que os otólitos são capazes de diferenciar grupos de indivíduos de estuários com características ambientais e ecológicas semelhantes. Entre as técnicas empregadas, a Análise Elíptica de Fourier destacou-se como a mais eficiente na discriminação da forma dos otólitos *sagittae* da espécie *Caranx latus*.

Apesar da proximidade entre os estuários, cada um exibiu características morfológicas distintas, influenciadas principalmente por fatores genéticos, filogenéticos e ambientais específicos de cada localidade. Portanto, a análise da forma do otólito surge como uma ferramenta eficaz não apenas na diferenciação de estuários com características fenotípicas estritamente semelhantes, mas também na identificação de unidades

populacionais, contribuindo para uma gestão mais eficaz dos recursos pesqueiros de águas interiores.

Esses resultando fornecem subsídios valiosos para futuros estudos taxonômicos e filogenéticos. No entanto, são necessários estudos adicionais para compreender melhor a contribuição do efeito genético em comparação com os efeitos ambientais e bióticos, a fim de esclarecer as diferenças observadas nos otólitos e sua relação com o ambiente estuarino.

8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P. R.; MONTEIRO-NETO, C.; TUBINO, R. A. & COSTA, M. R. Variações na forma do otólito sagitta de *Coryphaena hippurus* (Actinopterygii: Coryphaenidae) em uma área de ressurgência na costa sudoeste do Oceano Atlântico). **Museu de Ciências Naturais**. DOI 10.1590/1678-4766e2020019. 2020.

ALABAT, I. E. G. Caracterização morfométrica do otólito sagitta de *Lutjanus jocu* e *Lutjanus synagris* no Banco dos Abrolhos, Brasil./ Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS. **Dissertação**. 2019.

ASSIS, C. A., Estudo morfológico dos otólitos sagitta, asteriscus e lapillus de teleósteos (Actinopterygii, Teleostei) de Portugal Continental – a sua aplicação em estudos de filogenia, sistemática e ecologia. **Tese de Doutorado**. Universidade de Lisboa, Lisboa, 1004pp. 2000.

AVIGLIANO, E.; ROLÓN, M.E.; ROSSO, J.J.; MABRAGAÑA, E.; VOLPEDO, A. V. Utilização da morfometria de otólitos para identificação de três espécies simpátricas e morfologicamente semelhantes de *Astyanax* da Mata Atlântica (Argentina). **Ambiente**

Biol Peixes. 101(9):1319-28. <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0779-2>
» <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0779-2>. 2018.

BIRD, J. L.; EPPLER, D. T.; CHECKLEY JR, D. M. Comparisons of herring otoliths using Fourier series shape analysis. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 43, n. 6, p. 1228–1234, 1986.

BIZERRIL, C.R.F.S. e COSTA, P.A.S. Peixes marinhos do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: **SEMADS**, 234 p. 2001.

BONHOMME, V. & CLAUDE, J. Momocs : Outline Analysis Using R. J Stat Softw. 56:24. 2014.

BOOKSTEIN, F.L Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. **Cambridge University Press**, Cambridge. 455 p. 1991

BRAGA, R. A. P.; MOURA, H. F. & DUARTE, M. T. 1989. Impactos ambientais sobre a estrutura do manguezal de Suape. Pp . 32-42. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. **Departamento de Biologia Geral**. Laboratório de Ecologia. Projeto Avaliação de Impactos Ambientais em Zonas Estuarinas de Pernambuco Recife.

CADRIN, S. X. Advances in morphometric identification of fishery stock. **Reviews in Fish Biology and Fisheries** 10, 91-112. 2000.

CADRIN, S. X.; FRIEDLAND, K. D. The utility of image processing techniques for morphometric analysis and stock identification. **Fisheries Research**, 1999.

CALLE, D. A.; QUIÑONES, M. L.; ERAZO, H. J. & N. JARAMILLO. Discriminación por morfometría geométrica de once especies de Anopheles (Nyssorhynchus) presentes en **Colombia**. **Biomédica** 28: 371-385. 2008.

CAMARGO-NETO, L., MEYER, G. E., JONES, D.D., SAMAL, AA. K. Plant species identification using Elliptic Fourier leaf shape analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 50, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.004>. 2005.

CAMPANA, S. E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanism and applications. **Mas Ecol**. Progg Ser. Vol 188 263 – 297. 1999.

CAMPANA, S. E. Photographic atlas of fish otoliths of the Northwest Atlantic Ocean. Ottawa: **NRC Research Press**. 280p. 2004.

CAMPANA, S. E. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of fish biology*, **Wiley Online Library**, v. 59, n. 2, p. 197–242, 2005.

CAMPANA, S. E. & CASSELMAN, J. M. Stock discrimination using otolith shape analysis. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**. NRC Research Press, 50(5):1062-1083. DOI: 10.1139/f93-123. 1993.

CASSELMAN, J. M. Growth and relative size of calcified structures of fish. **Transactions of the American Fisheries Society**, Taylor & Francis, v. 119, n. 4, p. 673–688, 1990.

CPRH – **AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE** (2008). Disponível em: Acesso em: 12 de julho de 2022.

CAVALCANTI, A. D. Monitoring of trace elements in oysters marketed in Recife, Pernambuco, Brazil. **Caderno de Saúde Pública**, v.19(5), p. 1545-1551, 2003.

DIAZ, G.; et al., Elliptic Fourier descriptors of cell and nuclear shapes. In: Lestrel, P.E. eds. Fourier descriptors and their applications in biology. **Cambridge University Press**, pp. 307-321. 1998.

DRYDEN, I. L.; K.V. MARDIA. Statistical shape analysis. **John Wiley & Sons**, New York. 347 p. 1998.

DUARTE-NETO, P.; LESSA, R.; STOSIC, B. & MORIZE, E. The use of sagittal otoliths in discriminating stocks of common dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) off northeastern Brazil using multishape descriptors. **ICES Journal of Marine Science** 65(7):1144-1152. 2008.

EDDY, F. B. Ammonia in estuaries and effects on fish. n, v. 67, p. 1495-1513, 2005. Available from: [10.1111/j.1095-8649.2005.00930.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.2005.00930.x).

FARIAS, I.; VIEIRA, A. R.; GORDO, L. S.; FIGUEIREDO, I. Otolith shape analysis as a tool for stock discrimination of the black scabbardfish, *Aphanopus carbo* Lowe 1839 (Pisces : Trichiuridae), in Portuguese waters. *Sci Mar*. 73:47-53. Available from: <http://dx.doi.org/10.3989/scimar.2009.73s2047>. 2009.

FIGUEIREDO, J.L. & MENEZES, N.A. Manual dos peixes marinhos do sudeste do Brasil. II. **Teleostei** (1). São Paulo: Museu de Zoologia da USP. 110p. 1978.

FIGUEIREDO, J.L. & MENEZES, N.A. Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. III. **Teleostei** (2). São Paulo: Museu de Zoologia da USP. 90p. 1980.

FORNEL, R. Estudo da variação morfológica craniana entre quatro blocos populacionais de *Ctenomys lami* (Rodentia, Ctenomyidae) através de morfometria geométrica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 78 p. 2005.

GONZALEZ, J. G. Estuaries as nursery habitats for the horse-eye jack (*Caranx latus*) in north-eastern Brazil. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2021.

GREEN, B. S. et al. Tropical Fish Otoliths: Information for Assessment, **Management and Ecology**. New York: Springer, 2009.

GREEN, B. S. *et al.* Introduction to otoliths and fisheries in the tropics. **Tropical Fish Otoliths: Information for Assessment, Management and Ecology**, Springer Netherlands, p. 1–22, 2009.

HASTENRATH, S. & HELLER, L. Dynamic of Climatic Hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 110, 411-425. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49711046407>. 1977.

HONEBRINK, R. Fishing in Hawaii: a student manual. **Education Program, Division of Aquatic Resources**, Honolulu, Hawaii. 79p. 1990.

HONEBRINK, R. R. A review of the family Carangidae, with emphasis on species found in Hawaiian waters. Honolulu, Hawaii: **Division of Aquatic Resources, Dept. of Land & Natural Resources**, State of Hawai'i DAR Technical Report. 20–01. 2000.

JEMAA, S.; BACHA, M.; KHALAF, G.; DESSAILLY, D.; RABHI, K.; AMARA, R. What can otolith shape analysis tell us about population structure of the European sardine, *Sardina pilchardus*, from Atlantic and Mediterranean waters? **Journal of Sea Research**, v. 96, p. 11–17, 2015. DOI: 10.1016/j.seares.2014.11.002.

KLOKLER, D. Otólitos, para que te quero?. **Revista de Arqueologia**, v. 29, n. 1, p. 03-17, 1 jul. 2016.

KUHL, F. P. & GIARDINA, C. R. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer Graphics and Image Processing* 18:236-258. 1982.

LESTREL. Fourier Descriptors and Their Applications in Biology. Cambridge: Cambridge University Press, cap. 2, p. 22 – 44, 1997. 2008.

LOPES, D. F. C. *et al.*. O USO DA ICTIOFAUNA COMO BIOINDICADORA DE QUALIDADE AMBIENTAL DE ESTUÁRIOS NEOTROPICAIS. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO. RECIFE, 2018.

LUQUE, J. L. & ALVES, D. R. Ecologia das comunidades de metazoários parasitos, do xaréu, *Caranx hippos (Linnaeus)* e do xerelete, *Caranx tatus Agassiz (Osteichthyes, Carangidae)* do litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, vol. 18, no. 2, pp. 399-410. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-81752001000200011>. 2001.

LUQUE, J. L. & ALVES, D. R. Ecologia das comunidades de metazoários parasitos, do xaréu, *Caranx hippos (Linnaeus)* e do xerelete, *Caranx latus Agassiz (Osteichthyes, Carangidae)* do litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, vol. 18(2), 399–410. doi:10.1590/S0101-81752001000200011. 2001.

MONTEIRO, L. R. & REIS, S. F. Princípios de morfometria geométrica. **Holos Editora**, Ribeirão Preto. 189 p. 1999.

MONTEIRO, L. R., PAULA, A.; BENEDITTO, M. D.; GUILLERMO, L. H.; RIVERA, L.A. Allometric changes and shape differentiation of sagitta otoliths in sciaenid fishes. **Fish Res.** 74:288-99. Available from: <http://dx.doi:10.1016/j.fishres.2005.03.002>. 2005.

MORAES, D. A. A Morfometria Geométrica e a “Revolução na Morfometria”: localizando mudanças na forma dos organismos. 2003. Disponível: <http://www.bioetim.hpg.ig.com.br/III3/Artigos/moraes.htm>. Acesso: Junho de 2021.

MPA: Boletim Estatístico da Pesca e Aquicultura - Brasil 2010. Brasília, Brasil: **Ministério da Pesca e Aquicultura**, 129- 2012.

MUGGEO, V. M. R. Estimating regression models with unknown break-points. **Stat Med.** 22:3055-71. Available from: <http://dx.doi:10.1002/sim.1545>. 2003.

MUGGEO, V. M. R. segmented: An R Package to Fit Regression Models with BrokenLine Relationships. **R News.** 2008.

OLIVEIRA, E. P. Associação entre variáveis taxonômicas e ambientais com a forma de otólitos. **Dissertação** (Mestrado em Biometria) Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. p. 94. 2015.

PELAGE, L. Interpretando os efeitos antrópico-ambientais na ictiofauna ao longo dos habitats costeiros e marinhos no Nordeste do Brasil. PhD Thesis, Univ. Federal Rural de Pernambuco, Brazil, unpublished. 2020.

PERES-NETO, P.R. Introdução a análises morfométricas. p. 57-89. In: P.R. Peres-Neto; J.L. Valentin & F.A.S. Fernandez (Eds.). Tópicos em tratamentos de dados biológicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 161 p. 1995.

PONTON, D. Is Geometric Morphometrics Efficient for Comparing Otolith Shape of Different Fish Species?. **J Morphol.** 267:750–7. Available from: <http://dx.doi:10.1002/jmor>. 2006.

POPPER, A. N.; HOXTER, B. The fine structure of the sacculus and lagena of a teleost fish. **Hearing Research**, v.5, p. 245-263, 1981.

POPPER, A. N.; LU, Z. Structure–function relationships in fish otolith organs. **Fisheries research, Elsevier**, v. 46, n. 1, p. 15–25, 2000.

POPPER, A. N.; FAY, R. R. Sound detection and processing by fish: critical review and major research questions (part 1 of 2). **Brain Behav. Evol.** 41, 14–25. doi: 10.1159/000113821. 1993.

POPPER, A. N.; LU, Z. Structure-function relationship in fish otolith organs. **Fishery Research** 46, 15-25. 2000.

POPPER, A. N.; RAMCHARITAR, J.; CAMPANA, S. E.. Why otoliths? Insights from inner ear physiology and fisheries biology. **Marine Freshwater Research**, 56: 497-504. 2005.

RASHIDABADI, F.; ABDOLI, A.; TAJBAKHS, F.; NEJAT, F.; AVIGLIANO, E. Unravelling the stock structure of the Persian brown trout by otolith and scale shape. **Journal of Fish Biology**, v. 96, n. 2, p. 307–315, 2020.

REISS, K. L.; BONNAM, M.F. Ontogenetic scaling of caudal fin shape in squalus acanthias (Chondrichthyes, Elasmobranchii): A geometric morphometric analysis with implications for caudal fin functional morphology. **The Anatomical Record** 293, 1184-1191. 2010.

SCHULZ-MIRBACH T, LADICH F, PLATH M, HEÂ M. Pedras auditivas enigmáticas: o que sabemos sobre o papel funcional e a evolução dos otólitos de peixes. **Biol Rev.** 94:457–82. <https://doi.org/10.1111/brv.12463>
» <https://doi.org/10.1111/brv.12463>

SCHULZ-MIRBACH, T.; HESS, M.; PLATH, M. Inner ear morphology in the atlantic molly poecilia mexicana—first detailed microanatomical study of the inner ear of a cyprinodontiform species. **PLoS One, Public Library of Science**, v. 6, n. 11, p. e27734, 2011.

SILVA, R. W. da C.; PAULA, B. L. de. Causa do aquecimento global: antropogenica versus ^ natural. **Terræ Didatica**, v. 5, n. 1, p. 42–49, 2009.

SMITH-VANIZ, W. F. Carangidae. Jacks and scads (bumpers, pompanos, leatherjacks, amberjacks, pilotfishes, rudderfishes). **The living marine resources of the Western Central Atlhantic**. Vol. 3. 2003.

STRANSKY, C.; MURTA, A. G.; SCHLICKEISEN, J. & ZIMMERMANN, C. Otolith shape analysis as 48 a tool for stock separation of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in the Northeast Atlantic and Mediterranean. **Fish Res.**;89:159-66. Available from: <http://dx.doi:10.1016/j.fishres.2007.09.017>. 2008.

TRACEY, S,R.; LYLE, J. M. & DUHAMEL, G. Application of elliptical Fourier analysis of otolith form as a tool for stock identification. **Fish. Res.**;77:138-47. Available from: <http://dx.doi:10.1016/j.fishres.2005.10.013>. 2006

TUSET, V. M.; LOZANO, I. J.; GONZÁLEZ, J. A.; PERTUSA, J. F. & GARCÍA-DÍAZ, M. M. Shape indices to identify regional differences in otolith morphology of comber, *Serranus cabrilla* (L., 1758). **Journal of Applied Ichthyology** 19(2):88-93. DOI: 10.1046/j.1439-0426.2003.00344.x. 2003.

VASCONCELOS-FILHO J. E.; THOMSEN F. S. L.; Stosic B.; ANTONINO A. C. D., DUARTE, D. A., HECK R. J., LESSA R. P. T.; SANTANA F.M; FERREIRA B. P.; DUARTE-NETO, P. J. Peeling the Otolith of Fish: Optimal Parameterization for Micro-CT Scanning. **Frontiers in Marine Science** 6, 728. 2019.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. Análise multivariada aplicada as ciências agrárias: Análise de componentes principais. Seropédica - RJ: [s.n.], 2008.

VIANA, A. P.; FRÉDOU, F. L. Ichthyofauna as bioindicator of environmental quality in an industrial district in the amazon estuary, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**. v.74(2), p.315-324. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.16012>. 2014.

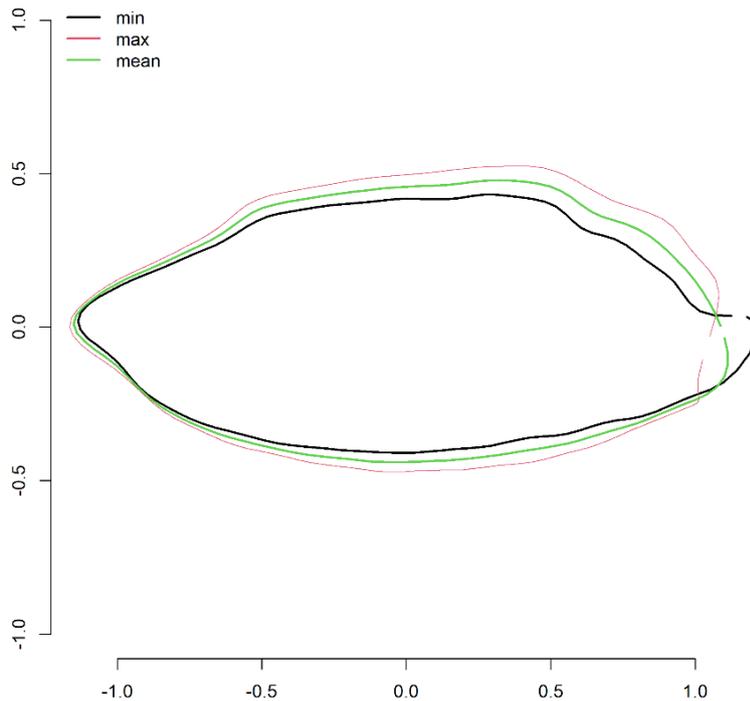
VIGNON, M. & MORAT, F. Environmental and genetic determinant of otolith shape revealed by a non-indigenous tropical fish. **Mar Ecol Prog Ser**. 411:231-41. Available from: <http://dx.doi:10.3354/meps08651>, 2010.

WORTHMAN, H.A. Relação entre o desenvolvimento do otólito e o crescimento do peixe aucilio na distinção de populações de pescada (*Plagioscion squamosissimus*). **Acta Amazônica** 9, 573-586. 1979.

WHITFIELD, A. K.; ELLIOTT, M. Fishes as indicators of environmental and ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future. 2002.

ZELDITCH, M. L., SWIDERSKI, D. L., & SHEETS, H. D. Geometric morphometrics for biologists: a primer. **Academic Press**. 2012.

APÊNDICE A



APÊNDICE A1. Média da forma do contorno dos otólitos do estuário de Suape.

Características	Estuário				
	Goiana	Santa Cruz	Suape	Sirinhaém	Rio Formoso
Tipo		Estuário	Lagoa costeira	Planície costeira	
Pressões humanas		Aquicultura, resíduos agrícolas, industriais e domésticos	Porto industrial, resíduos industriais e agrícolas	Industriais e domésticos	
Área vegetada (km ²)	28.43	48	23.1	17	19.96
Superfície da água (km ²)	8.11	25.5	6.6	1.7	7.83
Profundidade média (m)	2.2	3	3.1	2.6	4
Influência da água doce	Importante	Baixo	Baixo	Importante	Baixo
Nº de entradas marítimas	1	-	-	1	1
Largura das entradas marítimas (Km, média e alcance)	1.41	0,90 (0,5 - 1.3)	0,27 (0,18 - 0,35)	0,6	1,07
Faixa de salinidade	0.3 – 36.4	4,7 – 37,0	4,2 – 37,7	0,2 – 36,6	10-36.3
Faixa de temperatura (°C)	26.1 - 30.8	25,0 – 30,9	27.2 – 31.7	25 – 33.4	24.5-29.5

APÊNDICE A2. Resumo das características morfológicas e configurações ambientais dos estuários estudados ao longo da costa nordeste do Brasil. (Medeiros & Kjerfve 1993, Medeiros et al. 2001, Honorato da Silva et al. 2004, Silva et al. 2009, Otsuka et al. 2014, Lima et al. 2015, Gonzalez et al. 2019, Conti et al. 2020).