



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Eurico José Giacoia Penetra

Ecologia de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ, Brasil: diversidade da
assembléia e redes tróficas inferidas por isótopos estáveis de carbono e nitrogênio

Niterói

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Eurico José Giacoia Penetra

Ecologia de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas: diversidade da assembleia e redes tróficas inferidas por isótopos estáveis de carbono e nitrogênio

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre na área de Oceanografia e limnologia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Leite Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Rodrigues da Costa

Niterói

2025

EURICO JOSÉ GIACOIA PENETRA

Ecologia de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas: diversidade da assembleia e redes tróficas inferidas por isótopos estáveis de carbono e nitrogênio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre Área de Concentração: Oceanografia e Limnologia

Aprovada em 30 de junho de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Eduardo Leite Ferreira, Dr (Orientador)
Universidade Federal Fluminense - UFF

João Paulo de Sá Felizardo, Dr.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Paulo Roberto Camponoz de Almeida, Dr.
Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI

Prof. Rafael de Almeida Tubino, Dr.
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P397e Penetra, Eurico José Giacoia
Ecologia de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas ? RJ, Brasil
/ Eurico José Giacoia Penetra. - 2025.
52 f.

Orientador: Carlos Eduardo Ferreira Leite.
Coorientador: Marcus Rodrigues da Costa.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Geociências, Niterói, 2025.

1. Biologia marinha. 2. Análise isotópica específica. 3.
Produção intelectual. I. Leite, Carlos Eduardo Ferreira,
orientador. II. Costa, Marcus Rodrigues da, coorientador. III.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
IV. Título.

CDD - XXX

Agradecimentos

Gostaria, primeiramente, de expressar minha profunda gratidão à Universidade Federal Fluminense (UFF) e ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT), por proporcionarem a estrutura e o ambiente acadêmico que tornaram esta pesquisa possível.

À toda a equipe do Laboratório ECOPESSCA - UFF, meu sincero reconhecimento pela colaboração nas coletas e nos trabalhos de bancada. Cada esforço foi essencial, especialmente diante dos desafios das saídas a campo, que muitas vezes começavam às 4h da manhã e só terminavam no dia seguinte.

Ao Dr. Marcus Rodrigues, meu orientador, agradeço pela dedicação, paciência e pelo constante auxílio diante de todas as adversidades que surgiram. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Felipe Cadilho, pela valiosa ajuda nas análises, e ao João Felizardo, do Laboratório LARA - UFF, pelos conselhos e suporte nas análises de isótopos.

À CAPES, pela concessão da bolsa durante meu mestrado, viabilizando a realização deste estudo.

Um agradecimento especial ao Dr. Tailan, que, junto com o Dr. Marcus, representam minhas maiores fontes de inspiração e incentivo.

À minha família, pelo apoio e incentivo incondicional, especialmente à minha mãe, Valéria, e à minha madrinha, Catarina, cujo amor e força foram fundamentais em minha trajetória. Aos meus irmãos, Mário e Luiza, pela parceria e pelo carinho em todos os momentos.

Aos pescadores da Lagoa Rodrigo de Freitas, que acolheram e apoiaram esta pesquisa.

Aos professores do Instituto de Biologia da UFF, que sempre se mostraram disponíveis quando precisei de auxílio, meu muito obrigado. A todos que, mesmo não mencionados aqui, de alguma forma me ajudaram durante esta jornada na pós-graduação – cada gesto, palavra ou apoio fez diferença.

Resumo

Os ecossistemas lagunares, como a Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) no Rio de Janeiro, são ambientes costeiros de alta relevância ecológica, caracterizados por alta produtividade biológica e diversidade de espécies. Esses sistemas fornecem serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação climática e ciclagem de nutrientes, além de benefícios recreativos e de bem-estar. No entanto, sofrem intensa pressão antrópica devido à urbanização, poluição e alterações hidrológicas, resultando em eutrofização, perda de biodiversidade e simplificação da rede trófica. A LRF, conectada ao mar por um canal estreito, apresenta uma ictiofauna diversificada, mas com predominância de espécies oportunistas (como *Phalloptychus januarius*), indicativas de degradação ambiental. Comparações históricas revelam um declínio acentuado na diversidade, com apenas 13 das 64 espécies registradas anteriormente ainda presentes. Análises de isótopos estáveis ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) demonstraram uma teia alimentar influenciada por múltiplas fontes de carbono (fitoplâncton, vegetação bentônica e matéria orgânica terrestre) e uma estrutura trófica comprimida, com predadores de topo ocupando níveis próximos, possivelmente devido a impactos humanos. O estudo destaca a resiliência de espécies generalistas, mas alerta para a perda progressiva de biodiversidade e a necessidade urgente de medidas de conservação. A restauração da qualidade da água, a redução de poluentes e a gestão sustentável são essenciais para preservar os serviços ecossistêmicos e a biodiversidade remanescente na LRF.

Palavras-chave: Lagunas costeiras, Estratégias de história de vida, Isótopos estáveis, guildas tróficas

Abstract

Lagoon ecosystems, such as Rodrigo de Freitas Lagoon (RFL) in Rio de Janeiro, are coastal environments of high ecological relevance, characterized by high biological productivity and species diversity. These systems provide essential ecosystem services, such as climate regulation and nutrient cycling, in addition to recreational and well-being benefits. However, they face intense anthropogenic pressure due to urbanization, pollution, and hydrological alterations, resulting in eutrophication, biodiversity loss, and simplification of the food web. RFL, which is connected to the sea by a narrow channel, hosts a diverse fish fauna but is dominated by opportunistic species (such as *Phalloptychus januarius*), which are indicators of environmental degradation. Historical comparisons reveal a sharp decline in diversity, with only 13 of the 64 previously recorded species still present. Stable isotope analyses ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) demonstrated a food web influenced by multiple carbon sources (phytoplankton, benthic vegetation, and terrestrial organic matter) and a compressed trophic structure, with top predators occupying close levels—likely due to human impacts. The study highlights the resilience of generalist species but warns of progressive biodiversity loss and the urgent need for conservation measures. Restoring water quality, reducing pollutants, and sustainable management are essential to preserving ecosystem services and remaining biodiversity in RFL.

Keywords: Coastal lagoons, Life-history strategies, Stable isotopes, Trophic guilds

Sumário

Resumo	6
Introdução geral.....	10
Objetivos.....	14
Objetivo geral	14
Objetivos específicos	14
capítulo 1: Fish Assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil: Who Remains After Years of Transformation?	
Abstract	15
Introduction.....	16
Metodology	17
Study area.....	17
Sampling.....	19
Results	20
Discussion	25
capítulo 2: Cardume urbano: o que $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ revelam sobre a vida dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas?	
Resumo	29
Introdução	30
Metodologia	31
Área de estudo.....	31
Amostragem	31
Análises.....	33
Resultados.....	33
Discussão	44
Considerações finais.....	46
Referências	47

Lista de tabelas

Introdução geral

Tabela 1: Principais diferenças entre as estratégias de vida oportunistas, periódicas e estáveis.

capítulo 1: Fish Assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil: Who Remains After Years of Transformation?

Table 1. Numerical abundance (N, %), minimum and maximum total length (TL), trophic groups and life-history strategies of fish species captured in the Rodrigo de Freitas lagoon.

Table 2. Results of SIMPER analysis showing the fish species that contributed most to the dissimilarity between seasons in the Rodrigo de Freitas lagoon.

capítulo 2: Cardume urbano: o que $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ revelam sobre a vida dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas?

Tabela 1: Lista das espécies amostradas na LRF com os dados de abundância (N) média, amplitude e desvio padrão (SD) de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$).

Tabela 2: Abundância (N), média, amplitude e desvio padrão (SD) de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) para as cinco guildas nas estações verão e inverno.

Lista de figuras

capítulo 1: Fish Assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil: Who Remains After Years of Transformation?

Figure 1. Location of Rodrigo de Freitas Lagoon in Rio de Janeiro, Brazil, and delimitation of the five sampling areas (A1 to A5) used for fish surveys conducted in 2023.

Figure 2. Principal Component Analysis (PCA) biplot of environmental variables across seasons in Rodrigo de Freitas Lagoon. Symbols represent individual samples collected during different seasons: red circles (summer), orange triangles (autumn), blue squares (winter), and green diamonds (spring).

Figure 3. Diagrams of the first two axes of the dbRDA demonstrating the relationship between environmental variables versus fish assemblages (more abundant and frequent) in Rodrigo de Freitas lagoon.

Figure 4. Venn diagram showing the variation in the fish fauna composition of Rodrigo de Freitas Lagoon between the periods 1991 and 2004, highlighting the number of exclusive and shared species among the different time intervals.

capítulo 2: Cardume urbano: o que $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ revelam sobre a vida dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas?

Figura 1: Localização da Lagoa Rodrigo de Freitas no Rio de Janeiro, Brasil, e delimitação das cinco áreas de amostragem (A1 a A5) utilizadas para os levantamentos de peixes realizados em 2023.

Figura 2. Mapa de calor representando os gradientes de temperatura e salinidade na Lagoa Rodrigo de Freitas, comparando cinco áreas de amostragem (A1 a A5) durante os períodos de inverno e verão. QGIS Development Team. (2025).

Figura 3. Análise de Componentes Principais (PCA) baseada em variáveis ambientais (temperatura, salinidade, transparência, oxigênio dissolvido e clorofila-a) nas diferentes estações do ano na lagoa Rodrigo de Freitas, RJ. As setas indicam a correlação das variáveis com os eixos principais (PC1 e PC2). Os triângulos verdes representam as amostras coletadas no verão, enquanto os triângulos azuis correspondem às amostras do inverno.

Figura 4. Distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ dos principais produtores primários e consumidores aquáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) (A) e (B) Ampliação da área correspondente majoritariamente à ictiofauna, com melhor visualização da distribuição dos consumidores em diferentes níveis tróficos. Verde: RupMar – *Ruppia maritima*; plancton; folha de mangue. Roxo: MytLeu – *Mytilops leucophaeata*. Amarelo: Cic – *Cichilidae*; Eng – *Engraulidae*; Spa – *Sparidae*; Mug – *Mugilidae*; Hae – *Haemulidae*; Ger – *Gerreidae*; Ana – *Anablepidae*; Poe – *Poeciliidae*; Por – *Portunidae*. Vermelho: Cen – *Centropomidae*; Car – *Carangidae*; Elo – *Elopidae*; Sci – *Sciaenidae*; Ach – *Achiridae*. Azul: Clu – *Clupeidae*.

Figura 5: Biplot dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ separados por guildas. A: carnívoros (vermelho), onde: MicFur – *Micropogonias furnieri*; TriPau – *Trinectes paulistanus*; OliSau – *Oligoplites saurus*; EloSmi – *Elops smithi*; CarSp. – *Cranx sp.* (*Caranx hippos* e *Caranx latus*); CenSp. – *Centropomus sp.* (*Centropomus parallelus* e *Centropomus pectinatus*); ParOrb – *Paralichthys orbignyanus*. B: onívoros (amarelo), onde: CalSp. – *Callinectes sp.* (*Callinectes sapidus* e *Callinectes ornatos*); DiaSp. – *Diapterus sp.* (*Diapterus aurathus* e *Diapterus rhombeus*); PoeViv – *Poecilia vivípara*; DipArg – *Diplodus argenteus*; AwaTaj – *Awous tajacica*; PhaJan – *Phalloptychus januarius*; AthBra – *Atherinella brasiliensis*; FarPau – *Farfantepenaeus paulensis*; OrtRub – *Orthopristes rubra*; EucSp. – *Eucinostomus sp.* (*Eucinostomus gula* e *Eucinostomus argenteus*); JenLin – *Jenynsia lineata*; OreNil – *Oreochromis niloticus*; GeoBra – *Geophagus brasiliensis*. C: Verde, herbívoro: SarBra – *Sardinella brasiliensis*; CetEde – *Cetengraulis edentulus*; BreAur – *Brevortia aurea*; OpsOgl – *Opstthonema oglinum*; AncJan – *Anchoa januaria*; HemBra – *Hemiramphus brasiliensis*; marrom, detritívoro: MugCur – *Mugil curema* e MugLiz – *Mugil liza*.

Figura 6. Biplot dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para teia trófica da Lagoa Rodrigo de Freitas, RJ, durante o verão e o inverno. As áreas sombreadas representam as estimativas Kernel de densidade de nicho isotópico com intervalos de confiança de 50%, 75% e 95% para cada estação.

Introdução geral

Os ecossistemas lagunares são ambientes costeiros que foram formados em consequência do avanço e recuo do mar durante milhões de anos (Jesus et al., 2017). Estão distribuídos por quase toda a costa brasileira, tendo no estado do Rio de Janeiro a maior concentração desses ecossistemas (DOS Santos, 2008). As características gerais dos ambientes lagunares evidenciam sua relevância ecológica. As lagunas possuem águas calmas, elevada disponibilidade de recursos alimentares e uma diversidade de abrigos para organismos, além de apresentarem alta produtividade biológica, favorecendo o desenvolvimento de diversas espécies (Albertoni et al., 2003). Além disso, as lagunas desempenham funções essenciais, como a regulação do clima local, a drenagem de áreas adjacentes, ciclagem de nutrientes, entre outros serviços ecossistêmicos. A entrada de água doce nos sistemas controla a salinidade e no aumento do nível de água, proporcionando a viabilidade ecológica do sistema, além de desencadear a abertura da ligação com o mar, popularmente conhecido como abertura de barra (Knoppers; Kjerfve, 1999). Ao abordar os ambientes lagunares e seus serviços ecossistêmicos, é importante destacar sua contribuição para o bem-estar e a saúde mental. Esses ambientes proporcionam áreas de lazer, favorecendo a prática de esportes aquáticos e outras atividades recreativas. Além disso, as lagoas funcionam como espaços de relaxamento e equilíbrio emocional, graças à sua tranquilidade e beleza cênica.

Por estarem situados próximos ao mar a pressão antrópica sob os sistemas lagunares aumenta, principalmente devido ao crescimento populacional no seu entorno. Degradação da vegetação marginal, lançamento de efluentes domésticos e industriais, aterramento do espelho d'água, aumento da pressão de pesca, são alguns exemplos de ações que contribuem para a deterioração desses sistemas. Em consequência a algumas dessas ações obtemos como resultado processos de eutrofização, mortandade de peixes, implicações no ciclo reprodutivo das espécies, tudo resultando na redução da biodiversidade lagunar (Cloern, 2001; Santoro et al., 2012; Cutrim et al., 2025).

O estudo em questão tem como foco a Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF), localizada na cidade do Rio de Janeiro. Trata-se de um ecossistema costeiro que tem papel importante na bacia drenante da região, além de abrigar uma grande quantidade de organismos vivos, em especial, uma ictiofauna diversificada e abundante (Andreatta et al., 1997; Andreatta et al., 2004; Santoro, 2012). Esse sistema lagunar está ligado ao mar de forma perene apenas pelo estreito canal Jardim de Alah, dificultando a troca de água, sedimento e espécies e potencializando os efeitos das ações antrópicas, principalmente os

relacionados ao saneamento. A limitada troca de massas d'água entre essa laguna e o mar torna a salinidade um fator ambiental que seleciona espécies com habilidades osmorregulatórias específicas (Elliot & Quintino, 2007; Henriques et al., 2017), com exceções de espécies exclusivamente marinhas que chegam nesse ambiente estuarino devido aos picos de maré. Fatores como competição ecológica e a resistência a condições ambientais dinâmicas – incluindo oscilações de salinidade, temperatura e material em suspensão – são determinantes na formação das comunidades de peixes em zonas de transição entre rios e mar (Franco et al., 2022). Apesar da laguna em questão não possuir um grande espelho d'água, quando comparada as demais lagunas costeiras do estado do Rio de Janeiro, sua ictiofauna se mostra bem diversificada sendo composta por peixes marinhos e dulcícolas. Dentre as espécies que utilizam esse habitat os barrigudinhos se destacam pela quantidade, além de atuarem no controle de insetos, ao se alimentarem das larvas presentes na água (Andreata, 2012). Outras espécies que possuem importância socioeconômica são: tainha e parati (*Mugil spp.*), robalo (*Centropomus spp.*), tilápia (*Oreochromis niloticus*) e corviva (*Micropogonias furnieri*) que proporcionam renda para os pescadores artesanais da LRF (Cutrim et al., 2025).

A lagoa Rodrigo de Freitas possui um histórico de qualidade ambiental que reflete atualmente. Seu passado vai de fazenda a polo industrial, seguido de diversos processos de aterramento e desmatamento da vegetação marginal (Coelho, 2016). Esses fatores implicam no equilíbrio ecológico da laguna, interferindo na diversidade de espécies que habitam esse ecossistema. Ambientes que possuem instabilidade geralmente abrigam em sua maioria espécies de estratégia O (oportunistas) enquanto estratégia E (equilíbrio) são encontradas em ambientes estáveis. Quando falamos de tipos de estratégia de vida, as espécies O por estarem mais aptas a viver em ambientes estressados, priorizam a reprodução rápida e em grandes quantidades devido não garantia de sobrevivência. Já as espécies E priorizam a sobrevivência e o desenvolvimento de poucos descendentes, uma vez que são adaptadas a viver em ambientes estáveis. Além dessas estratégias, temos as espécies P (periódicas). Semelhante as espécies E, as espécies P possuem maior capacidade adaptativa que as espécies E, além de serem boas competidoras por recursos, como alimento e espaço, no seu ambiente (Bond et al., 2021; Raesly et al., 2022). Vale ressaltar que a distinção entre as estratégias é relativa, as estratégias reprodutivas podem variar dentro de uma mesma espécie, dependendo do ambiente e das condições. Na tabela 1 podemos observar as principais diferenças entre esses três tipos de estratégia.

Tabela 1: Principais diferenças entre as estratégias de vida oportunistas, periódicas e estáveis (Hitt et al., 2020; King & McFarlane, 2003; Winemiller & Rose, 1992).

Estratégia	Geração	Porte	Fecundidade	Características		Ambiente típico
				Cuidado	Parental	
Oportunista	Curta	Pequeno	Baixa	Ausente		Instável, perturbado
Periódica	Longa	Grande	Alta	Ausente		Sazonal, previsível
Equilíbrio	Moderada	Variável	Baixa	Presente		Estável, competitivo ou estressante

A composição da comunidade de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) reflete diretamente o grau de equilíbrio ambiental desse ecossistema lagunar. Por exemplo, caso exista uma predominância de espécies oportunistas - caracterizadas por ciclos de vida curtos, alta tolerância a variações ambientais e rápida colonização de habitats perturbados - serve como um bioindicador claro de desequilíbrio ecológico. Esse padrão, se encontrado, pode estar associado tanto às condições ambientais atuais quanto ao histórico de impactos antrópicos sofridos pela lagoa. Apesar da pressão antrópica, a ictiofauna da LRF apresenta uma notável diversidade funcional, composta por espécies de diferentes origens biogeográficas (marinhas, estuarinas e dulcícolas) e guildas tróficas variadas (herbívoros, detritívoros, piscívoros e onívoros) (Andreata et al., 2004; Cutrim et al., 2025). Essa heterogeneidade ecológica sustenta uma rede trófica estruturalmente complexa, cujas interações podem ser precisamente quantificadas através de abordagens isotópicas.

Isótopos estáveis de diversos elementos têm sido utilizados em estudos ecológicos, especialmente aqueles que estão presentes em todos os organismos vivos, como carbono (C), nitrogênio (N), oxigênio (O), hidrogênio (H) e enxofre (S) (Fry, 2006). As relações tróficas representam elos das cadeias alimentares, constituindo pontos de transferência de energia (Ricklefs, 2003). O estudo das relações tróficas na comunidade de peixes da Lagoa Rodrigo de Freitas foi realizado mediante a aplicação da análise de isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$). O $\delta^{13}\text{C}$ atua como um marcador eficaz para identificar as fontes primárias de carbono que sustentam a cadeia alimentar, permitindo distinguir entre contribuições de diferentes habitats, como ambientes marinhos, que apresentam valores isotopicamente mais enriquecidos, e sistemas de água doce, com assinaturas mais empobrecidas. Além disso, esse isótopo possibilita compreender sobre a mobilidade ontogenética dos organismos, revelando mudanças nos hábitos alimentares ao longo de seu desenvolvimento, bem como alterações nas fontes de carbono decorrentes de processos como a eutrofização.

Por outro lado, o $\delta^{15}\text{N}$ oferece informações valiosas sobre a estrutura trófica da comunidade, indicando o nível trófico ocupado por cada espécie. A amplitude de valores

de $\delta^{15}\text{N}$ reflete a complexidade da teia alimentar, sendo que uma maior variabilidade está associada a uma maior diversidade de nichos tróficos (Peterson et al., 1987; Layman et al., 2007; Layman et al., 2012).

Dessa forma, a análise combinada de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ não apenas elucida as relações tróficas e a conectividade entre habitats, mas também fornece uma ferramenta robusta para monitorar alterações ecológicas e os efeitos de perturbações antrópicas no ecossistema lagunar (Marsella et al., 2011; Rossi, 2020). Essa abordagem integrada permite uma compreensão mais abrangente da dinâmica trófica e dos processos ecológicos na Lagoa Rodrigo de Freitas, contribuindo para estratégias de conservação e manejo sustentável (Manefield et al., 2016).

As modificações ocasionadas no ecossistema da LRF estabelecem alterações na estrutura biológica e dinâmica de todas as espécies e suas relações. Assim, a análise das relações tróficas estabelecida entre as espécies é essencial para o diagnóstico da situação da LRF. A motivação desse estudo tem como base a preocupação socioambiental baseada na sustentabilidade. É imprescindível que todos possam usufruir desse ambiente natural e de todos os serviços ecossistêmicos que ele possibilita.

Pergunta

Como as mudanças ambientais e antrópicas na Lagoa Rodrigo de Freitas afetam a estrutura da comunidade de peixes, desde sua composição até as interações tróficas ?

Premissa

A Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF), um ecossistema lagunar urbano altamente impactado, vem sofrendo perda acelerada de biodiversidade devido à urbanização, eutrofização e redução da conectividade com o mar. Essas alterações ambientais devem favorecer espécies com estratégias de vida oportunistas, em detrimento de espécies periódicas e de equilíbrio, levando a uma simplificação ecológica da comunidade de peixes.

Hipótese:

A teia alimentar da LRF é sustentada por fontes diversificadas de carbono, com fitoplâncton dominando no período mais produtivo (verão) e contribuições bentônicas/terrestres (ex.: mangue) em estações com menor renovação hídrica.

A diversidade de espécies de peixe apresentará maior quantidade de espécies oportunistas devido a pressão antópica que a LRF sofreu e sofre com o passar dos anos.

Espécies generalistas (ex.: *Oreochromis niloticus*) exibirão maior plasticidade trófica e enriquecimento em $\delta^{15}\text{N}$, refletindo influência antrópica, enquanto predadores topo (ex.: *Centropomus spp.*) terão nichos isotópicos mais estáveis, porém comprimidos devido à degradação ambiental.

Objetivos

Objetivo geral

Analisar a composição e dinâmica trófica da ictiofauna na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ, Brasil, avaliando os impactos das transformações ambientais ao longo dos anos e a influência sazonal para subsidiar estratégias de conservação.

Objetivos específicos

capítulo 1: Fish Assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil: Who Remains After Years of Transformation?

Avaliar a influência de variáveis ambientais na estruturação da comunidade de peixes da Lagoa Rodrigo de Freitas;

Investigar o papel da conectividade com o mar na manutenção de espécies de valor ecológico e pesqueiro;

Comparar a composição atual da ictiofauna com dados históricos para quantificar a perda de biodiversidade e identificar espécies persistentes.

capítulo 2: Cardume urbano: o que $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ revelam sobre a vida dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas?

Caracterizar as principais fontes de carbono que sustentam a teia alimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas, utilizando isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) para identificar a contribuição relativa de cada via energética;

Avaliar a influência da sazonalidade e das variáveis na estrutura trófica da ictiofauna, analisando variações nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre espécies e guildas alimentares;

Investigar a amplitude e sobreposição de nichos isotópicos das espécies dominantes, identificando padrões de plasticidade trófica e competição por recursos em resposta a gradientes espaciais.

Capítulo 1

(Artigo submetido a revista Ocean and Coastal Research)

Fish Assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil: Who Remains After Years of Transformation?

Abstract

Rodrigo de Freitas Lagoon (RFL) has undergone intense environmental changes in recent decades, driven by accelerated urbanization, domestic sewage discharge, and hydrodynamic alterations. This study investigated the current composition of fish assemblages in RFL, with emphasis on life history strategies, seasonal variations, and environmental influences. A total of 36 species distributed across 20 families were recorded, with a predominance of opportunistic species such as *Phalloptychus januarius*, *Jenynsia lineata*, and *Geophagus brasiliensis*, which are well adapted to unstable and degraded environments. Comparisons with historical data revealed a marked loss of diversity: of the 64 species recorded between 1991 and 2004, only 13 remain, indicating a process of ecological simplification. Seasonal analysis showed higher species richness and abundance during summer and winter, associated with pronounced variations in water transparency, dissolved oxygen, and chlorophyll concentration. The absence of significant differences among sampling sites suggests environmental homogenization, likely resulting from limited water renewal and intensification of anthropogenic impacts around the lagoon. Environmental variables, particularly salinity and water transparency, played a key role in shaping fish community structure, influencing the distribution patterns of *Brevoortia aurea*, *B. pectinata*, *Poecilia vivipara*, and *Phalloptychus januarius*. The resilience of opportunistic species such as *P. vivipara* and *P. januarius* contrasts with the presence of species exhibiting Periodic or Equilibrium life-history strategies, including *Micropogonias furnieri*, *Mugil liza*, *Centropomus spp.*, *Diplodus argenteus*, and *Caranx spp.*, suggesting that marine influence still persists, especially in areas closer to the tidal channel. These findings indicate that, although RFL still supports species of ecological and fisheries importance, its biodiversity continues to decline, compromising both ecosystem resilience and fisheries sustainability. Our results highlight the urgent need for effective conservation and management strategies applied to urban lagoon systems.

Key-words: Seasonality, Environmental influences, Life cycle strategies, Coastal lagoons

Resumo

A Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) tem passado por intensas transformações ambientais nas últimas décadas, impulsionadas pela urbanização acelerada, lançamento de esgoto doméstico e alterações hidrodinâmicas. Este estudo investigou a composição atual das assembleias de peixes da LRF, com ênfase nas estratégias de história de vida, nas variações sazonais e nas influências ambientais. Foram registradas 36 espécies

distribuídas em 20 famílias, com predomínio de espécies oportunistas, como *Phalloptychus januarius*, *Jenynsia lineata* e *Geophagus brasiliensis*, adaptadas a ambientes instáveis e degradados. Comparações com dados históricos revelam uma expressiva perda de diversidade: das 64 espécies registradas entre 1991 e 2004, apenas 13 ainda estão presentes, evidenciando um processo de simplificação ecológica. A análise sazonal indicou maior riqueza e abundância de espécies no verão e inverno, em resposta a variações acentuadas na transparência, no oxigênio dissolvido e na clorofila da água. A ausência de diferenças significativas entre os pontos de amostragem sugere uma homogeneização ambiental, possivelmente decorrente da baixa renovação hídrica e da intensa urbanização no entorno. Variáveis ambientais, especialmente salinidade e transparência da água, exerceram influência sobre a estrutura da comunidade ictiológica, influenciando a distribuição de *Brevoortia aurea*, *B. pectinata*, *Poecilia vivipara* e *Phalloptychus januarius*. A resiliência de espécies oportunistas, como *P. vivipara* e *P. januarius*, contrasta com a ocorrência de espécies com estratégias de história de vida Periódicas ou de Equilíbrio, como *Micropogonias furnieri*, *Mugil liza*, *Centropomus* spp., *Diplodus argenteus* e *Caranx* spp., indicando que a influência marinha ainda persiste, especialmente em áreas mais próximas ao canal de comunicação com o mar. Os resultados demonstram que, embora a LRF ainda abrigue espécies de valor ecológico e pesqueiro, sua biodiversidade segue em declínio, comprometendo a sustentabilidade da pesca e a resiliência do ecossistema. Nossos achados reforçam a urgência de ações eficazes de conservação e manejo para lagunas urbanas.

Palavras-chave: Sazonalidade, influências ambientais, estratégias de história de vida e lagunas costeiras

Introduction

Urban and industrial expansion has caused severe degradation of lagoon systems and adjacent aquatic environments, especially in tropical coastal regions, where lagoons serve as natural filters that regulate the flow of terrestrial materials both natural and anthropogenic into the sea (Alves et al., 2021). In such systems, bottom sediments often accumulate high concentrations of toxic elements and compounds derived from domestic and industrial effluents. Rodrigo de Freitas Lagoon (RFL), located in the city of Rio de Janeiro, exemplifies this process. Over recent decades, the lagoon has experienced a reduction in water surface area, continuous sewage inflows, and the buildup of organic matter (Soares et al., 2012). These conditions have led to recurring episodes of eutrophication and fish kills, frequently associated with phytoplankton blooms (Domingos et al., 2012; Vezzzone et al., 2018). The severity of these impacts is intensified by the dense urbanization of the watershed, the lack of effective sanitation policies, and limited water renewal mainly due to poor maintenance of the sluice gate connecting the lagoon to the sea making the system particularly vulnerable to anthropogenic pressures (Gandhi et al., 2020).

These transformations have been ongoing since the late 19th century, primarily driven by urbanization and substantial ecosystem alteration in the surrounding areas due to shoreline landfilling and increased surface impermeability (Rodrigues, 2012). Despite these challenges, lagoon and estuarine systems such as RFL play a crucial ecological and

socioeconomic role. They provide key ecosystem services, including the regulation of hydro-sedimentary flows, the provision of habitats for a wide array of species, and support for recreational and economic activities such as fishing (Pérez-Ruzafa et al., 2019). As semi-enclosed water bodies subject to seasonal variations in salinity, temperature, and turbidity, these environments are especially sensitive to anthropogenic pressures — highlighting the need for effective conservation and management strategies (Costa et al., 2021).

In support of this concern, a previous study by Moraes et al. (2014) reported significant changes in the ichthyofaunal composition of RFL over two decades, revealing declines in species richness, abundance, and biomass. The study also identified correlations between fish composition and richness across different zones of the lagoon, ranging from more favorable environmental conditions near the marine inlet to more degraded conditions in the inner areas, impacted by organic waste and habitat loss. Fish assemblages in transitional ecosystems like coastal lagoons are shaped by complex interactions between biotic and abiotic factors such as salinity, temperature, depth, and the availability of shelter and food which act as environmental filters (Moraes et al., 2014; Freitas and Araujo, 2025). These systems function as important nursery, feeding, recruitment, and migratory areas for various species and are thus essential for sustaining fish populations (Costa et al., 2021; Franco et al., 2022). Assessing fish diversity and its relationship with environmental variables is therefore a strategic tool for the sustainable management and conservation of these ecosystems.

Given RFL's long history of environmental degradation and its status as a transitional ecosystem subject to pronounced physicochemical fluctuations and anthropogenic pressures, it is important to investigate how such conditions influence the life-history strategies of the fish species that inhabit it. Highly disturbed environments tend to favor Opportunistic strategists characterized by early reproduction, high fecundity, and short generation times while more stable or marine-influenced environments are more likely to support Periodic or Equilibrium strategists, which display moderate reproductive investment, medium to large body size, and longer generation times (Hitt et al., 2020; King & McFarlane, 2003; Winemiller & Rose, 1992). This study hypothesizes that fish assemblages in Rodrigo de Freitas Lagoon reflect this ecological duality. A predominance of Opportunistic species is expected in response to local environmental and anthropogenic stressors, coexisting with Periodic and Equilibrium species associated with marine influence. Investigating these strategies will enhance our understanding of the adaptive mechanisms that shape the composition and structure of fish communities in urban lagoon ecosystems.

Methodology

Study area

The Rodrigo de Freitas Lagoon is a hypereutrophic coastal system, highly impacted by the discharge of metals, domestic waste, and other organic substances (Loureiro et al., 2009; Loureiro et al., 2012). It is an urban lagoon located in the southern zone of Rio de Janeiro city, covering an area of 2.2 km², with an estimated volume of 6,200,000 m³, a mean depth of 2.8 m, and a maximum depth of 4.0 m (RIOÁGUAS, 2013; Gandhi et al., 2020). The lagoon is artificially connected to the sea through the Jardim de Alah channel, which is approximately 800 m long, with a width varying between 10 and 18 m, and a section where the depth reaches only 0.7 m. Due to the inefficient and irregular water

exchange through the artificial channel whose connection is intermittently opened to prevent canal overflow and consequent urban flooding the lagoon exhibits a high water residence time, varying from hours to weeks depending on the channel's operation and the inflow from the two main rivers. This prolonged residence time limits water renewal and promotes the accumulation of organic matter throughout the system, ultimately affecting its ecological dynamics (Moraes et al., 2014).

According to Vezzzone et al. (2018), sediments from the northern section of the lagoon are predominantly silty, highly eutrophic, and contain elevated levels of potentially toxic metals and organic matter. In contrast, sediments in the southern section are less contaminated, characterized by a coarser texture and lower concentrations of metals and organic matter. Additionally, most of the lagoon's original perimeter has been altered by landfilling activities (Enrich-Prast, 2012). The hydrographic basin of the lagoon is composed of three main rivers: Cabeça, with a drainage area of 1.9 km²; Macacos, with 7.2 km²; and Rainha, with 4.3 km².

Rodrigo de Freitas Lagoon was subdivided into five sampling areas (A1 to A5), based on environmental characteristics, surrounding land use, and the distribution of marginal and submerged vegetation. Area A1, located near the outlet to the sea, between the Jardim de Alah Canal and Caiçaras Island, features sandbanks, rocky outcrops, and vegetation composed of grasses, trees, and mangrove remnants. Area A2, situated near Piraquê Island, receives water from rivers and canals and has shores occupied by aquatic macrophytes and a narrow strip of mangrove. Area A3, characterized as a stormwater drainage zone, contains marginal vegetation consisting of grasses and tree species. Area A4, in the central region of the lagoon and near the Catacumba Municipal Natural Park, includes a retaining wall with a rocky base, marginal vegetation, and a deck used for rowing activities (Botafogo Rowing Club). Area A5 lies within a cove, with shores vegetated by grasses and a marginal mangrove strip, as well as a recreational deck with paddle boats (Moraes et al., 2014; Rodrigues et al., 2021). Between areas A1 and A3, there are fixed and demarcated lanes designated for rowing sports, where fishing is prohibited.

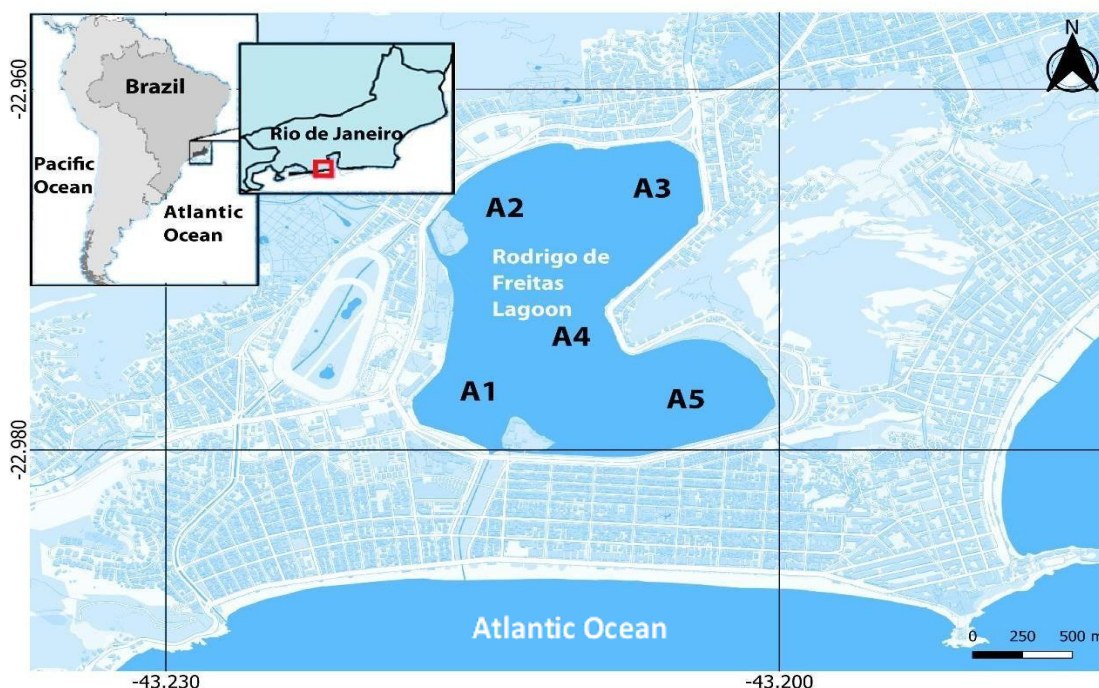


Figure 1. Location of Rodrigo de Freitas Lagoon in Rio de Janeiro, Brazil, and delimitation of the five sampling areas (A1 to A5) used for fish surveys conducted in 2023.

Sampling

Fish sampling and measurements of environmental variables were conducted quarterly in Lagoa Rodrigo de Freitas throughout 2023, with one campaign corresponding to each season: March (summer), May (autumn), August (winter), and November (spring). On each sampling occasion, a standardized protocol was applied, consisting of five cast net throws using three different mesh sizes (0.5 mm, 15.0 mm, and 25.0 mm), along with one gillnet set with 35 mm opposite-knot mesh, composed of 15 panels (each 100.0 m long) and 3.5 m in height (Andreato 2012; Cutrim et al., 2025). At each sampling site, the following environmental parameters were recorded using a Hydrolab HL7 multiparameter probe: temperature (°C), salinity, dissolved oxygen – DO (mg/L), chlorophyll-a (mg/L). Water transparency was measured separately using a Secchi disk. All collected specimens (license SISBIO #85777-1) were placed in labeled plastic bags and stored on ice for transport to the laboratory. There, individuals were sorted and identified to the lowest possible taxonomic level using standard identification guides (e.g., Figueiredo and Menezes 1978, 1980, 2000; Menezes and Figueiredo 1980, 1985). Each specimen was measured for total length (to the nearest 0.1 mm) and weighed using an electronic scale with 0.001 g precision. All procedures were conducted in accordance with ethical standards and applicable regulations.

Environmental data were normalized, and fish abundance and species richness data were log-transformed [$\log_{10}(x + 1)$] to generate Euclidean distance and Bray-Curtis similarity matrices, respectively. A two-way permutational analysis of variance (PERMANOVA) was used to assess differences in environmental variables, fish abundance and species richness, (based on multivariate matrices with species as variables) across sampling sites and between seasons. When significant effects were detected, post hoc pairwise

comparisons were performed to identify which sites or periods differed significantly. To evaluate differences in data dispersion among sites and seasons, a multivariate homogeneity of dispersion test (PERMDISP; Anderson et al., 2006) was applied. The combined use of PERMANOVA and PERMDISP allowed us to determine whether observed variability was due to location effects, dispersion effects, both, or neither. Additionally, principal component analysis (PCA) was performed on the environmental variables to identify potential spatial or temporal patterns. Prior to the analysis, the full set of environmental variables was tested for collinearity using Draftsman plots and a Spearman correlation matrix. Redundant variables with correlation coefficients (r) > 0.7 were excluded from the final model to avoid multicollinearity. The importance of each species across spatial and temporal gradients was assessed by combining two complementary metrics: numerical percentage (N%) and frequency of occurrence (FO%). The classification of trophic groups (Elliott et al., 2007) and life-history strategies (Winemiller, 2005) was used to assess how different fish functional groups relate to abiotic variables, based on their distinct patterns of habitat use and environmental tolerance. This integrated approach allowed for a more robust evaluation of species dominance and distribution patterns, considering not only abundance and biomass, but also how consistently each species occurred among sampling events. To complement PERMANOVA results, and further evaluate similarities on species composition between seasons and sites, similarity percentage analysis (SIMPER) was conducted on PRIMER-E v.6 (Clarke and Gorley, 2006). Only species with an overall abundance equal to or greater than 1.0% and a frequency of occurrence (FO) of at least 15% were included in the analysis. The relationship between the fish community structure and environmental variables was assessed using distance-based linear models (DistLM). DistLM allows for the identification of predictive relationships between multivariate response data summarized in a similarity matrix and one or more explanatory variables (Anderson et al. 2008). In this analysis, Bray–Curtis similarity matrices were used as the response variable, and environmental predictors were tested using a best selection procedure based on the AIC criterion. Once the best-fitting model was identified, distance-based redundancy analysis (dbRDA) was performed to visualize the relationship between fish assemblages and environmental variables in a reduced multidimensional space. All statistical analyses were performed with the R statistical software version 4.0.0 (R CORE TEAM, 2020) and package PRIMER 6.0 (Clarke and Gorley 2006) and PERMANOVA+ for PRIMER (Anderson et al. 2008).

Results

A total of 2,856 individuals belonging to 36 fish species and 20 families were captured. Families with higher species richness included *Gerreidae* (4), *Clupeidae*, *Carangidae*, *Centropomidae* (3) and *Dorosomatidae*, *Gobiidae*, *Engraulidae*, *Poeciliidae*, *Mugilidae*, *Cichlidae* (2). The remaining families were represented only by a single species. Eleven species, each accounting for more than 1% of the total abundance and occurring in at least 15% of the samples, together represented over 90% of the total numerical abundance. The five most abundant species ($n > 150$ ind.) *Phalloptychus januarius*, *Jenynsia lineata*, *Geophagus brasiliensis*, *Anchoa januaria*, *Atherinella brasiliensis* together represented nearly 73% of the total numerical abundance, whereas 25 species with individual numerical abundances of less than 1% accounted for 5.08% of the total catch. The two-way PERMANOVA revealed no significant differences in abundance or species richness between sites and seasons ($p > 0.05$). Nevertheless, both abundance and richness were

higher during summer and winter (Summer: 1,303 individuals, 20 species; Winter: 951 individuals, 31 species) compared to autumn and spring (Autumn: 358 individuals, 8 species; Spring: 264 individuals, 10 species) (Tab. 1).

Table 1. Numerical abundance (N,%), minimum and maximum total length (TL, cm), trophic groups and life- history strategies of fish species captured in the Rodrigo de Freitas lagoon.

Species	N	%N	FO	TL (min)	TL (max)	Trophic groups	Strategy
<i>Anchoa januaria</i>	172	6,02	20	5	10,1	Planktivore /Carnivore	O
<i>Atherinella brasiliensis</i>	171	5,99	60	3	6,63	Omnivore/Carnivore	O
<i>Awaous tajasica</i>	1	0,04	5	11,4	11,4	Omnivore	O
<i>Brevoortia aurea</i>	103	3,61	15	22,5	28	Planktivore/ Herbivore	O
<i>Brevoortia pectinata</i>	137	4,80	20	23,5	28	Planktivore/ Herbivore	O
<i>Caranx hippos</i>	3	0,11	5	25,5	26	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Caranx latus</i>	1	0,04	5	22	22	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Centropomus parallelus</i>	1	0,04	5	42,2	42,2	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Centropomus pectinatus</i>	3	0,11	5	41,2	45	Carnivore/Piscivore	P
<i>Centropomus undecimalis</i>	1	0,04	5	49,5	49,5	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Cetengraulis edentulus</i>	2	0,07	10	16,5	17,5	Planktivore/ Herbivore	O
<i>Diapterus auratus</i>	23	0,81	10	16,2	19,8	Omnivore (benthivorous)	O
<i>Diapterus rhombeus</i>	2	0,07	5	14	15	Omnivore (benthivorous)	O
<i>Diplodus argenteus</i>	10	0,35	5	15	19	Omnivore	E
<i>Elops smith</i>	4	0,14	10	27,5	44,5	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Eucinostomus argenteus</i>	75	2,63	20	6,8	17,7	Omnivore	O
<i>Eucinostomus gula</i>	13	0,46	10	9	19,6	Omnivore	O
<i>Geophagus brasiliensis</i>	264	9,24	55	2	27	Omnivore /Detritivore	E
<i>Harengula clupeola</i>	1	0,04	5	16	16	Planktivore	O
<i>Hemiramphus brasiliensis</i>	1	0,04	5	28,5	28,5	Omnivore/Herbivore	O
<i>Jenynsia lineata</i>	306	10,71	40	2	7,6	Omnivore	O
<i>Microgobius meeki</i>	7	0,25	10	3,2	6,1	Carnivore (benthivorous)	O
<i>Micropogonias furnieri</i>	10	0,35	10	27	34,2	Carnivore (opportunistic)	P
<i>Mugil curema</i>	16	0,56	10	14,5	39,5	Detritivore	O
<i>Mugil liza</i>	88	3,08	30	3,4	47,3	Detritivore	P
<i>Mugil sp.</i>	1	0,04	5	2,6	10,7	Detritivore	P
<i>Oligoplites saurus</i>	3	0,11	10	19,2	26,3	Carnivore/ Piscivore	P
<i>Opisthonema oglinum</i>	18	0,63	30	23	27	Herbivore/ Planktivore	O
<i>Oreochromis niloticus</i>	70	2,45	35	2,8	32	Omnivore	E
<i>Orthopristis rubra</i>	16	0,56	5	18,5	25,5	Omnivore	O
<i>Paralichthys orbignyanus</i>	1	0,04	5	18,7	18,7	Carnivore (benthivorous)	P
<i>Phalloptychus januario</i>	1184	41,46	35	2	4,9	Omnivore	O
<i>Poecilia vivipara</i>	141	4,94	35	2,5	3,59	Omnivore	O
<i>Sardinella brasiliensis</i>	1	0,04	5	20,6	20,6	Planktivore	O
<i>Syngnathus pelagicus</i>	4	0,14	15	7,2	14	Planktivore	O
<i>Trinectes paulistanus</i>	2	0,07	5	12,6	14,7	Carnivore (benthivorous)	O
Total	2856	100					

Environmental conditions in Rodrigo de Freitas Lagoon varied significantly across seasons and sampling sites, as indicated by the PERMANOVA analysis (season: Pseudo- $F = 13.02$, $P = 0.0001$; sites: Pseudo- $F = 2.07$, $P = 0.0001$). However, pairwise comparisons between sites did not reveal statistically significant differences. To assess

whether the observed variation was due to differences in group dispersion, a multivariate dispersion analysis (PERMDISP) was applied. The results showed no significant differences in dispersion among seasons ($F = 5.10$; $P = 0.075$) or among sites ($F = 2.39$; $P = 0.20$). These findings suggest that the patterns detected by PERMANOVA reflect true environmental differences across temporal and spatial scales, rather than differences in within-group variability. The highest temperatures were recorded during summer ($\bar{x} = 30.47$ °C), and the lowest during autumn ($\bar{x} = 23.36$ °C), while winter and spring showed intermediate values ($\bar{x} = 28.64$ °C and 29.26 °C, respectively) (Pseudo- $F = 216.11$, $P = 0.0001$). Salinity peaked in spring ($\bar{x} = 12.98$), whereas the other seasons exhibited lower and relatively similar values, ranging from 9.41 to 9.95 (Pseudo- $F = 49.24$, $P = 0.0003$). Water transparency was lower in winter and spring ($\bar{x} = 0.87$ m and 0.63 m, respectively) compared to summer and autumn ($\bar{x} = 2.12$ m and 1.64 m) (Pseudo- $F = 19.66$, $P = 0.0001$). Dissolved oxygen and chlorophyll-a displayed similar seasonal patterns, with lower concentrations during summer and autumn (DO: $\bar{x} = 3.65$ and 5.71 mg/L; Chl-a: $\bar{x} = 4.80$ and 16.88 µg/L) and higher concentrations during winter and spring (DO: $\bar{x} = 19.51$ and 12.41 mg/L; Chl-a: $\bar{x} = 72.53$ and 50.54 µg/L, respectively) (DO: Pseudo- $F = 14.43$, $P = 0.0002$; Chl-a: Pseudo- $F = 4.80$, $P = 0.01$).

The first two principal components (PC1 and PC2) explained 64.9% of the total variance in the environmental data, with PC1 accounting for 44.9% and PC2 for 19.9%. The PCA biplot revealed a clear seasonal separation of samples. Summer samples (red circles) clustered predominantly in the right-hand quadrant, while winter samples (blue squares) were concentrated on the left-hand side of the ordination. Autumn (orange triangles) and spring (green diamonds) samples occupied intermediate positions, indicating a transitional pattern in environmental conditions throughout the annual cycle. Based on the eigenvectors, PC1 was strongly and positively correlated with water transparency (0.618), and negatively correlated with salinity (−0.464), chlorophyll-a (−0.449), and dissolved oxygen (−0.389). This axis appears to represent a gradient from clearer, less productive waters (positive side) to more saline and productive waters (negative side). PC2 showed negative correlations with water temperature (−0.570) and salinity (−0.519), and a positive correlation with dissolved oxygen (0.603), indicating that this component reflects a thermal-salinity gradient inversely related to oxygen availability.

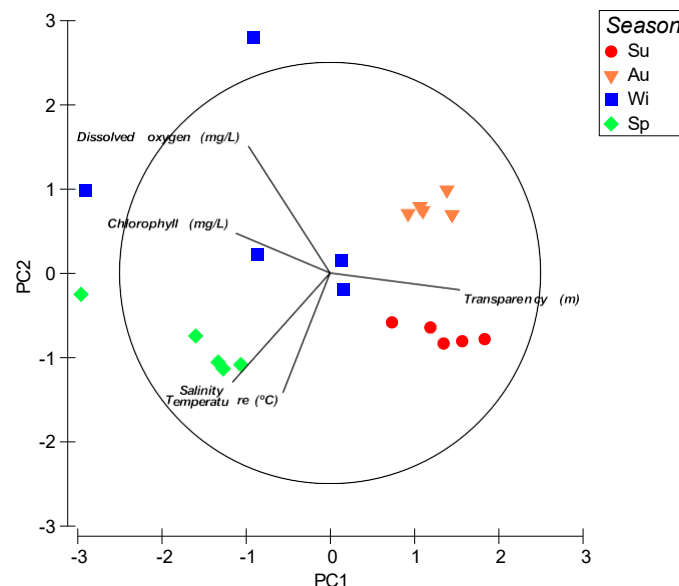


Figure 2. Principal Component Analysis(PCA) biplot of environmental variables across seasons in Rodrigo de Freitas Lagoon. Symbols represent individual samples collected during different seasons: red circles (summer), orange triangles (autumn), blue squares (winter), and green diamonds (spring).

The DistLM analysis indicated that, among the environmental variables assessed, salinity had the highest explanatory power over the structure of the biological community (Pseudo-F = 4.68, $p = 0.0002$), accounting for approximately 20.6% of the total variation. Water transparency also had a significant effect (Pseudo-F = 2.67, $p = 0.0098$), explaining around 12.9% of the variation. Other variables — temperature, dissolved oxygen, and chlorophyll — did not show significant effects on community composition ($p > 0.05$). The ordination produced by the dbRDA analysis (Figure 3a) supports these patterns, showing a clear separation of sampling points according to the seasons. The first axis (dbRDA1), which accounts for 23% of the total variation (55.9% of the adjusted variation), is strongly negatively correlated with salinity ($r = -0.843$), indicating that this variable is the main driver of group separation along this dimension. The second axis (dbRDA2), responsible for 8.7% of the total variation (21.2% of the adjusted variation), is more positively associated with dissolved oxygen ($r = 0.876$) and water transparency ($r = 0.374$). In the ordination plot (Figure 3a), winter samples are concentrated in the lower left quadrant of the graph, associated with higher salinity values. Spring samples appear in the upper left quadrant, more related to higher levels of dissolved oxygen. Summer and autumn samples are located on the right side of the plot, especially associated with higher transparency and chlorophyll values. These results suggest seasonal variation in the biological community composition, strongly modulated by salinity gradients and, to a lesser extent, by transparency and dissolved oxygen. The lack of a significant relationship with temperature and chlorophyll may indicate that these variables have less influence on species distribution in the studied system. The overlay of species vectors in the dbRDA diagram (Figure 3b) reveals clear seasonal patterns of association between taxa and environmental gradients. Species such as *Mugil liza* (Mugliz), *Brevoortia aurea* (Breaur), and *Brevoortia pectinata* (Brepec) are positioned between the winter and spring groups, indicating an affinity for more saline environments and, in the case of *Mugil liza*, also for more oxygenated waters. Conversely, *Geophagus brasiliensis* (Geobra) and *Oreochromis niloticus* (Orenil) are associated with summer and autumn samples, suggesting a preference for lower salinity and higher phytoplankton availability — conditions typical of these seasons, characterized by higher water transparency and elevated chlorophyll levels. Species such as *Atherinella brasiliensis* (Athbra), *Jenynsia lineata* (Jenlin), and *Poecilia vivipara* (Poeviv) are found closer to the autumn group, suggesting that variables such as transparency and primary productivity are key factors for their occurrence, possibly reflecting distinct trophic strategies. Additionally, *Phalloptychus januarius* (Phajan) and *Anchoa januaria* (Ancjan) show associations with summer and autumn, respectively, reinforcing this trend of affinity with eutrophic conditions and clearer waters. Finally, *Eucinostomus argenteus* (Eucarg) is positioned between the autumn and winter groups, indicating a preference for transitional environments with intermediate salinity, transparency, and chlorophyll typical of mixing zones between estuarine and coastal waters.

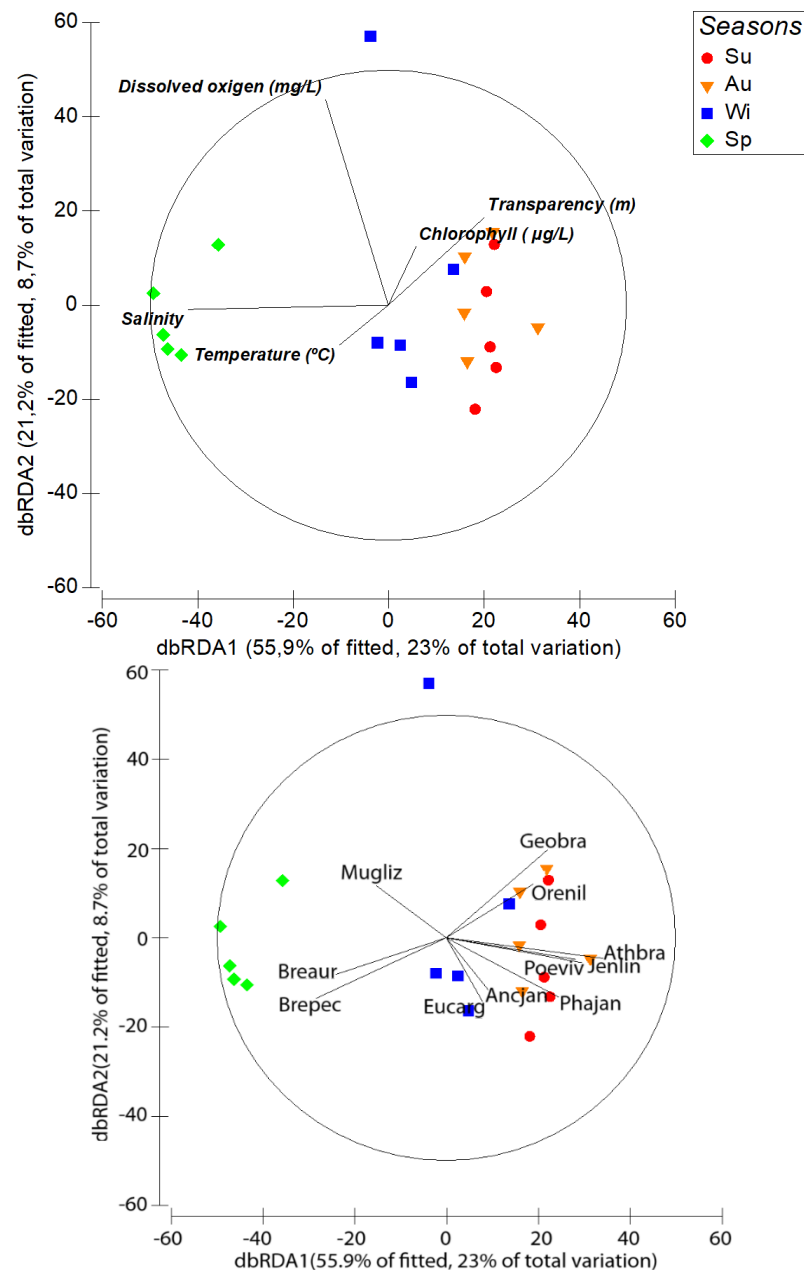


Figure 3. Diagrams of the first two axes of the dbRDA demonstrating the relationship between environmental variables versus fish assemblages (more abundant and frequents) in Rodrigo de Freitas lagoon.

The SIMPER analysis revealed that the greatest dissimilarities in fish assemblage composition occurred between the following seasonal pairs: summer vs. spring, autumn vs. spring, and winter vs. spring (Table 2). These results indicate that spring represents an ecological transition period, marked by the presence of more euryhaline species such as *Mugil liza*, *Brevoortia aurea*, and *Brevoortia pectinata*. Furthermore, the replacement of winter-associated species by those adapted to less saline and more productive conditions such as *Geophagus brasiliensis* contributes significantly to these dissimilarities. Summer, on the other hand, is characterized by a greater abundance of species adapted to warmer, eutrophic environments. Among the species analyzed, *Phalloptychus januarius*,

Geophagus brasiliensis, *Jenynsia lineata*, and *Poecilia vivipara* contributed most to the dissimilarity between seasons, standing out for their sensitivity to seasonal variation.

Table 2. Results of SIMPER analysis showing the fish species that contributed most to the dissimilarity between seasons in the Rodrigo de Freitas lagoon.

Groups	Su vs Au	Su vs Au	Su vs Wi	Su vs Wi	Su vs Sp	Su vs Sp	Au vs Wi	Au vs Wi	Au vs Sp	Au vs Sp	Wi vs Sp	Wi vs Sp
Average dissimilarity	64.20		75.09		95.03		77.61		96.10		92.33	
Species	Av.Diss.	Contrib%	Av.Diss.	Contrib%	Av.Diss.	Contrib%	Av.Diss.	Contrib%	Av.Diss.	Contrib%	Av.Diss.	Contrib%
<i>Phalloptychus januarius</i>	11,69	18,20	9,96	13,27	12,49	13,15	8,56	11,02	6,91	7,20	8,68	9,40
<i>Jenynsia lineata</i>	9,86	15,35	7,96	6,97	6,25	6,58	7,67	9,89	12,91	13,43	5,23	5,66
<i>Geophagus brasiliensis</i>	8,61	13,41	6,74	8,97	7,03	8,40	6,87	8,86	12,72	13,24	8,99	9,74
<i>Poecilia vivipara</i>	7,77	12,10	5,10	6,79	9,62	10,12	5,71	7,36			5,60	6,07
<i>Atherinella brasiliensis</i>	7,03	10,95	6,83	9,10	12,68	13,34	7,00	9,02	13,48	14,03		
<i>Anchoa januaria</i>			5,18	7,90			5,71	7,36			5,23	5,67
<i>Mugil liza</i>			4,54	6,05			5,11	6,58			6,36	6,89
<i>Oreochromis niloticus</i>			4,37	5,82			4,10	5,28			3,63	3,93
<i>Eucinostomus argenteus</i>			3,84	5,11			3,38	4,35			3,76	4,07
<i>Anchoa januaria</i>							6,16	7,94				
<i>Brevoortia pectinata</i>					10,52	11,07			12,01	12,50	8,51	9,22
<i>Brevoortia aurea</i>					6,95	7,32			7,92	9,24	6,02	6,52
<i>Microgobius meeki</i>											3,69	4,00

Discussion

This study revealed that, despite the intense environmental and urban transformations that have occurred in Rodrigo de Freitas Lagoon over the past century, the system still harbors a relatively diverse fish community, comprising 36 species distributed across 20 families. The dominance of a few numerically abundant species such as *Phalloptychus januarius*, *Jenynsia lineata*, and *Geophagus brasiliensis* indicates the prevalence of opportunistic life-history strategists adapted to unstable and highly impacted environmental conditions. The absence of statistically significant differences in species abundance and richness across sampling sites and seasons suggests a degree of environmental homogenization, likely linked to habitat degradation and limited water renewal. Nonetheless, marked seasonal variations in the physicochemical characteristics of the water particularly in temperature and salinity were observed, influencing the structure of the fish community throughout the year. Higher species richness and abundance were recorded during summer and winter, highlighting the role of seasonal fluctuations as structuring forces in the lagoon's ichthyofaunal dynamics (Andreata, 2012), even within a heavily anthropized environment.

Comparing the data obtained in 2023 with historical records of the ichthyofauna in Rodrigo de Freitas Lagoon reveals a consistent and concerning process of local biodiversity decline. While Andreata et al. (2004) identified 64 species between 1991 and 2004, with the highest diversity recorded between 1991 and 1996 (59 species; Andreata, 2012), the current survey detected only 36 species, 29 of which had been previously reported. This marked reduction in species richness reflects not only a loss of diversity over time but also the persistence of a reduced number of more tolerant species adapted to the degraded environmental conditions. This observation aligns with Pérez-Ruzafa et al. (2013), who noted that unpredictable temporal heterogeneity, such as extreme events including increased rainfall, favors opportunistic species that dominate unpredictable and stressful environments characterized by rapid and intense fluctuations. The lagoon's alteration history includes cumulative processes of eutrophication, hydrodynamic changes caused by engineering works, introduction of exotic species, recurrent fish

mortality episodes, and ongoing urban pressures, all contributing to the structural simplification of the fish community (Machado et al., 2009; Domingos et al., 2012; Gandhi et al., 2020). The Venn diagram analysis (Figure 4) confirms species turnover across different periods, with only 18 species recurring between 1991 and 2004, 13 of which persist until 2023, including economically valuable and locally important artisanal fishery species such as *Micropogonias furnieri*, *Sardinella brasiliensis*, *Centropomus parallelus*, *C. undecimalis*, *Mugil liza*, and *Mugil curema*. Although different capture methods were employed in each period, the consistency between current results and historical data strengthens the conclusion that the ichthyofauna of Rodrigo de Freitas Lagoon has been undergoing a continuous process of ecological simplification and diversity loss, with significant implications for fishery sustainability and lagoon ecosystem resilience.

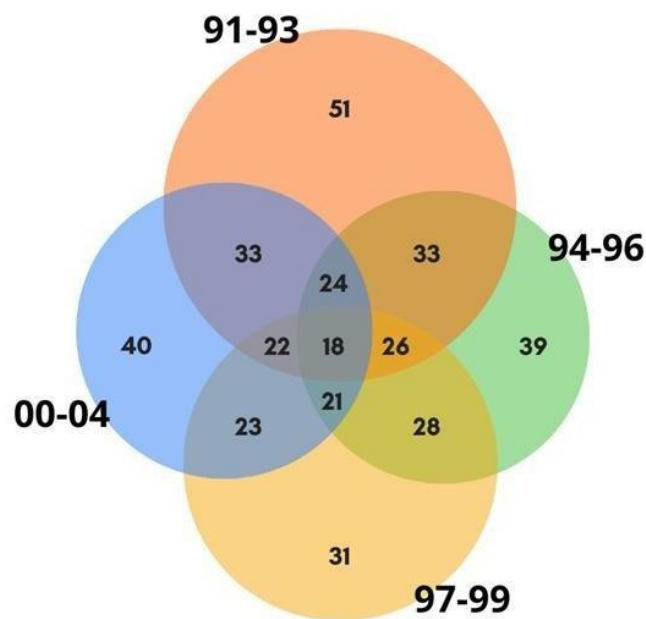


Figure 4. Venn diagram showing the variation in the fishfauna composition of Rodrigo de Freitas Lagoon between the periods 1991 and 2004, highlighting the number of exclusive and shared species among the different time intervals.

The variations illustrated in the Venn diagram reflect shifts in the ichthyofaunal composition of Rodrigo de Freitas Lagoon across the analyzed periods, totaling 63 species with variable occurrence over time. Notable overlaps occur between the periods 1991–1993 and 1994–1996, and between 1991–1993 and 2000–2004, both sharing 33 species. However, only 18 species were consistently recorded between 1991 and 2004, of which 13 remained present in 2023. These data confirm the persistence of a reduced set of species, many of ecological and fishery importance, that sustain the structure of the current community.

The absence of statistically significant differences in species richness and abundance among sampling sites, as indicated by PERMANOVA, confirm the environmental homogenization imposed by intense urbanization in the surrounding area and limited water renewal flow, particularly in the lagoon's inner zones. Nevertheless, greater richness and abundance were observed during summer (richness = 32 species and abundance = 1295) and winter (richness = 45 species and abundance = 938), suggesting

seasonal influence on the ichthyic community dynamics, possibly associated with variations in temperature and freshwater input from rainfall or river inflow. Based on the obtained results, it is evident that environmental variables played a crucial role in structuring the ichthyofaunal community of Rodrigo de Freitas Lagoon. Similar to the findings of Moraes et al. (2014), salinity emerged as the primary factor explaining biological composition, reflecting the influence of opening and closing events of the connection to the sea, as discussed by Souza et al. (2011) and Domingos et al. (2012). Our data revealed that the highest salinity values were recorded during spring, coinciding with lower water turbidity and reduced chlorophyll-a concentrations, indicating a more marine and less productive environment. This trend was also evidenced by the negative correlation between salinity and the first axis of the PCA.

The strong negative association between salinity and the abundance of *Brevoortia aurea*, as reported by Moraes et al. (2014), was also observed in our data, although with an opposite pattern, suggesting possible spatial or temporal variations in the species' response to environmental conditions. Periods and locations with higher salinity levels (A1) tended to be dissociated from favorable conditions for this species, whose greatest abundance was observed in years and sites with lower salinity (A2 and A3 for *Brevoortia aurea*; A3 and A5 for *Brevoortia pectinata*) (Andreata et al., 2004). This pattern may be related to the greater tolerance of *Brevoortia* to less saline and more eutrophic estuarine environments. In addition to restricting their distribution, elevated salinity can promote water column stratification and the consequent reduction of dissolved oxygen, especially when combined with factors such as the absence of wind, high temperatures, the presence of organic matter, and freshwater input. Such conditions are frequently associated with fish mortality events, as also reported by Andreata et al. (1997) and Domingos et al. (2012).

Another notable factor was water transparency, which showed a significant correlation with community composition, especially during summer and autumn months, when higher transparency coincided with lower chlorophyll-a and dissolved oxygen concentrations. These results suggest that, in periods of greater thermal stability and lower primary productivity, the biological community reorganizes differently compared to winter and spring, which are characterized by higher productivity (elevated chlorophyll-a) and better water column oxygenation. This pattern may be associated with a greater dominance of cyanobacteria during these periods, as observed by Domingos et al. (2012) in years of high phytoplankton biomass and low oxygen levels, conditions that negatively affected sensitive species such as *Brevoortia aurea* and *Brevoortia pectinata*.

The resilience of species such as *Poecilia vivipara* and *Poecilia januarius*, frequently abundant even under adverse conditions, corroborates the findings of Moraes and Andreata (1994), who identified a diet based on cyanobacteria and epibenthic algae and high reproductive plasticity as key factors for the survival of these species during periods of environmental degradation (Pereira and Andreata, 2003; Andreata, 2012). These results reinforce the importance of understanding the seasonal dynamics of environmental variables, particularly salinity, transparency, and dissolved oxygen, in maintaining biodiversity and in the early diagnosis of conditions conducive to fish mortality events in the lagoon.

Although connectivity between the lagoon and the sea via the Canal do Jardim de Alah is intermittent and often ineffective, the presence of species with Periodic or Equilibrium

strategies, such as *Micropogonias furnieri*, *Mugil liza*, *Centropomus* spp., *Diplodus argenteus*, *Caranx* spp., among others, indicates that marine influence still persists, especially in regions closer to the outlet (area A1). These species, generally medium to large-sized and with longer life cycles, depend on more stable environmental conditions and are sensitive to water quality, highlighting the importance of maintaining estuarine connectivity for the conservation of functional diversity.

The sampled areas of Rodrigo de Freitas Lagoon (Rio de Janeiro, Brazil) exhibited distinct levels of habitat complexity. Site A1 stood out due to its high structural heterogeneity, comprising sandbanks, rocky outcrops, and a mosaic of riparian vegetation, including remnants of mangrove forest. Site A2 also showed substantial structural complexity, characterized by freshwater inflow, aquatic macrophytes, and fringing mangroves. A5, located within a semi-enclosed embayment, combined marginal vegetation with recreational use, representing an intermediate habitat structure. In contrast, A3, influenced by stormwater runoff, presented reduced vegetation cover, while A4, strongly artificialized, was defined by a rocky substrate and retaining walls, offering the lowest structural complexity (Andreata et al., 2004; Andreata, 2012; Moraes et al., 2014; Rodrigues et al., 2021). Although no statistically significant differences in fish abundance and species richness were detected among sites, spatial patterns mirrored the heterogeneity of shoreline habitats and adjacent land-use features. Sites with greater structural complexity particularly A1 and A5 harbored higher species richness (31 and 27 species, respectively), underscoring the ecological importance of aquatic and riparian vegetation as refuge, feeding grounds, and nursery habitats. These observations align with previous studies emphasizing the role of vegetated habitats in supporting fish assemblages in eutrophic coastal systems (Costa et al., 2021). The classification of LRF as a hypereutrophic system, along with the documented accumulation of heavy metals and organic matter in northern and central sectors (Vezzzone et al., 2018), likely contributes to the absence of stenotopic species and the dominance of taxa tolerant to hypoxia and elevated nutrient loads. The predominance of fine sediments, low average depth, and seasonal thermal stratification further promote unfavorable microhabitats for sensitive species, resulting in a simplified trophic structure (citation needed). Despite some degree of resilience in the current fish community, the low representation of fishery-relevant species and the numerical dominance of a few tolerant taxa indicate a functionally impoverished assemblage. These attributes compromise ecosystem services such as fisheries productivity and biological regulation, while also reducing the ecological stability of the lagoon under additional anthropogenic stressors (Perez-Ruzafa et al., 2019).

The working hypothesis that fish assemblage composition reflects an ecological duality between local anthropogenic impacts and marine influence was supported by the predominance of Opportunistic strategists, characteristic of degraded environments, co-occurring with Periodic and Equilibrium strategists in more marine-influenced zones. These results highlight the urgent need for public policies aimed at restoring connectivity with the sea, reducing land-based nutrient and pollutant inputs, and rehabilitating marginal habitats. Finally, the application of life-history strategy frameworks proved to be a powerful approach for diagnosing ecological degradation, assessing management effectiveness, and guiding adaptive conservation strategies in heavily impacted urban coastal ecosystems.

Capítulo 2

Cardume urbano: o que $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ revelam sobre a vida dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas?

Resumo

Este estudo investigou a dinâmica trófica da ictiofauna na Lagoa Rodrigo de Freitas, um ecossistema lagunar urbano, utilizando isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) para avaliar as fontes de carbono e a estrutura da teia alimentar. Foram realizadas amostragens sazonais em 2023, analisando parâmetros físico-químicos da água e a composição isotópica de 29 espécies de peixes, além de produtores primários e consumidores secundários. Os resultados revelaram uma forte influência sazonal, com diferenças significativas entre verão e inverno em variáveis como temperatura, salinidade e transparência da água. A teia alimentar apresentou múltiplas fontes de carbono, incluindo contribuições pelágicas (fitoplâncton), bentônicas (vegetação submersa) e terrestres (folhas de mangue). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variaram amplamente, refletindo a diversidade de recursos utilizados, enquanto o $\delta^{15}\text{N}$ indicou uma estrutura trófica estratificada, porém comprimida, com predadores de topo ocupando posições próximas. Espécies onívoras, como *Oreochromis niloticus* e *Geophagus brasiliensis*, exibiram valores elevados de $\delta^{15}\text{N}$, sugerindo influência antrópica (esgoto). A plasticidade trófica da ictiofauna foi evidenciada por variações sazonais nas assinaturas isotópicas, destacando sua adaptação às mudanças ambientais.

Palavras-chave: Isótopos estáveis, dinâmica trófica, guildas tróficas, nicho isotópico

Abstract

This study investigated the trophic dynamics of the ichthyofauna in Rodrigo de Freitas Lagoon, an urban coastal lagoon ecosystem, using stable isotopes of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) to assess carbon sources and food web structure. Seasonal sampling was conducted in 2023, analyzing physicochemical water parameters and isotopic composition of 29 fish species, along with primary producers and secondary consumers. Results revealed strong seasonal influences, with significant differences between summer and winter in variables such as temperature, salinity, and water transparency. The food web exhibited multiple carbon sources, including pelagic (phytoplankton), benthic (submerged vegetation), and terrestrial (mangrove leaves) contributions. $\delta^{13}\text{C}$ values varied widely, reflecting the diversity of utilized resources, while $\delta^{15}\text{N}$ indicated a stratified yet compressed trophic structure, with top predators occupying adjacent positions. Omnivorous species such as *Oreochromis niloticus* and *Geophagus brasiliensis* displayed elevated $\delta^{15}\text{N}$ values, suggesting anthropogenic influence. The trophic plasticity of the ichthyofauna was evidenced by seasonal variations in isotopic signatures, highlighting their adaptation to environmental changes.

Keywords: Stable isotopes, trophic dynamics, trophic guilds, isotopic niche

Introdução

As lagoas costeiras são ecossistemas aquáticos continentais, localizados paralelamente à linha de costa e separados do mar por barreiras arenosas, cordões litorâneos ou outras formações terrestres. Sua principal característica é a conexão com o oceano por uma ou mais aberturas, que podem permanecer permanentemente abertas ou se fechar de forma intermitente, permitindo uma troca limitada de água e organismos com o mar (Kjerfve, 1994; Pérez-Ruzafa et al., 2019). Ocupando cerca de 13% das zonas costeiras globais, esses ambientes estão sujeitos a uma ampla variedade de forçantes naturais, como descarga fluvial, marés, balanço entre precipitação e evaporação, ventos e intervenções antrópicas (Esteves et al., 2008; Almeida et al., 2024). Caracterizados por múltiplas interações entre ambientes marinhos e terrestres, os ecossistemas lagunares concentram significativa parcela da população humana, o que, somado ao processo de urbanização, tem intensificado o uso não sustentável de seus recursos naturais (Costa et al., 2021; Cutrim et al., 2025). Naturalmente sujeitos a flutuações ambientais e marcados por forte variabilidade espaço-temporal, resultante de energias físicas como o vento, as marés e a circulação hídrica (Pérez-Ruzafa et al., 2019; Moreno-Pérez et al., 2024), essas lagoas são ambientes sensíveis a alterações adicionais causadas por atividades humanas. Devido às suas características geomorfológicas e hidrológicas, como baixas profundidades e volumes relativamente reduzidos, as lagunas costeiras respondem rapidamente às variações diárias e sazonais de temperatura e salinidade, frequentemente influenciadas por corpos d'água adjacentes (Rodrigues-Filho et al., 2023). Além disso, são ambientes sujeitos a alterações rápidas na turbidez e na penetração da luz, controladas principalmente pela ação do vento e pelas ondas, que promovem a ressuspensão de sedimentos de fundo (Esteves et al., 2008; Rodrigues-Filho et al., 2023). Essa combinação de atributos físicos, químicos e biológicos faz das lagunas costeiras ambientes altamente produtivos e, conseqüentemente, de grande interesse científico, econômico e social (Anthony et al., 2009; Costa et al., 2021). Como resultado, esses sistemas fornecem uma ampla gama de serviços ecossistêmicos, bens naturais e benefícios que contribuem diretamente para o bem-estar humano.

A análise de isótopos estáveis tornou-se uma ferramenta fundamental na ecologia trófica, com um aumento expressivo de estudos nas últimas décadas (Shipley & Matich, 2020). Essa abordagem tem sido amplamente utilizada para reconstruir a dieta de organismos (Zandonà et al., 2017), identificar variações intraespecíficas nas estratégias alimentares (Bearhop et al., 2004), elucidar as principais fontes de energia que sustentam as teias tróficas (Neres-Lima et al., 2016) e calcular a posição trófica das espécies (Reis et al., 2020). Também tem permitido compreender a partilha e a sobreposição de nichos, bem como as respostas de populações e comunidades a distúrbios ambientais (Layman et al., 2007a, 2007b; Carvalho et al., 2019). Por meio da análise da composição isotópica de predadores e de suas presas, a estrutura e o funcionamento das teias alimentares vêm sendo cada vez mais bem delineados (Benedito-Cecílio et al., 2000; Franco, et al., 2020). Nesse contexto, os isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) são os mais utilizados, permitindo a identificação das fontes de energia assimiladas ($\delta^{13}\text{C}$) e a determinação da posição trófica dos organismos ($\delta^{15}\text{N}$), com aplicações que vão da caracterização de interações tróficas locais à comparação entre diferentes ecossistemas (Layman et al., 2012; Fry & Davis, 2015; Krumsick & Fisher, 2019; Blonar et al., 2021).

A composição isotópica dos tecidos reflete diretamente a assimilação das fontes alimentares ao longo do tempo (Albrecht et al., 2021). O $\delta^{13}\text{C}$ possui um comportamento relativamente conservativo entre os níveis tróficos, com um enriquecimento geralmente inferior a 1‰, o que permite identificar a origem das fontes de energia utilizadas pelos consumidores, distinguindo, por exemplo, entre recursos aquáticos e terrestres, pelágicos e bentônicos ou costeiros e oceânicos (Fry, 2008). Por outro lado, o $\delta^{15}\text{N}$ sofre um enriquecimento médio de 3,4‰ a cada transferência trófica, permitindo a estimativa da posição trófica dos organismos dentro da cadeia alimentar (Post, 2002). Além dessas aplicações, os isótopos estáveis oferecem uma perspectiva quantitativa sobre o nicho trófico, entendido como o espaço multidimensional que uma espécie ocupa em seu ambiente, conceito originalmente proposto por Hutchinson (1957 apud Soberón e Arroyo-Peña, 2017) e posteriormente refinado por diversos autores (Layman et al., 2007; Jackson et al., 2011; Soberón & Arroyo-Peña, 2017). A análise isotópica, portanto, permite inferir não apenas as fontes alimentares, mas também a amplitude e a sobreposição de nichos entre espécies ou populações, contribuindo para o entendimento das interações tróficas e da estrutura das comunidades (Layman et al., 2007; Abrantes et al., 2014).

Diante da relevância ecológica, econômica e social das lagoas costeiras, especialmente em um contexto de crescente pressão antrópica, torna-se essencial aprofundar o conhecimento sobre suas dinâmicas tróficas e os fluxos de energia que sustentam suas comunidades biológicas. Como signatário da Convenção de Ramsar, tratado internacional voltado para a conservação e o uso racional das zonas úmidas, o Brasil compromete-se a promover o uso sustentável desses ambientes por meio de planejamento territorial, desenvolvimento de políticas públicas, elaboração de legislações específicas, ações de manejo e programas de educação ambiental. No entanto, ainda existem lacunas significativas no entendimento dos processos ecológicos que sustentam os serviços ecossistêmicos dessas áreas, como a função de berçário e a provisão de recursos pesqueiros. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo descrever as interações tróficas e o nicho isotópico da ictiofauna da Lagoa Rodrigo de Freitas, a partir da análise da composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$), visando compreender os padrões de utilização do habitat e dos recursos alimentares disponíveis, de forma a subsidiar estratégias de manejo sustentável para este sistema lagunar urbano.

Metodologia

Área de estudo

A Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF), localizada na zona sul do município do Rio de Janeiro, constitui um sistema lagunar costeiro com área superficial de 2,2 km². Este corpo d'água recebe aporte hídrico de três tributários principais - os rios Rainha, Macacos e Cabeça - os quais foram integralmente canalizados em um único emissário que deságua na região do Clube Naval (Cutrim, 2025). A conexão com o ambiente marinho é mantida através do Canal Jardim de Alah, com extensão de 800 metros, que permanece obstruído na maior parte do ano, restringindo significativamente as trocas hídricas, o transporte de sedimentos e a dispersão de organismos entre os sistemas lagunar e marinho (Andreatta et al. 1997; Moraes et al., 2014).

A dinâmica hidrológica do sistema é caracterizada por uma gestão artificial das comportas, que são abertas apenas em duas situações específicas: durante períodos de maré alta ou quando ocorre elevação significativa do nível d'água na lagoa. Esse regime

de controle hidráulico resulta da diferença entre o espelho d'água da LRF e o nível médio do mar.

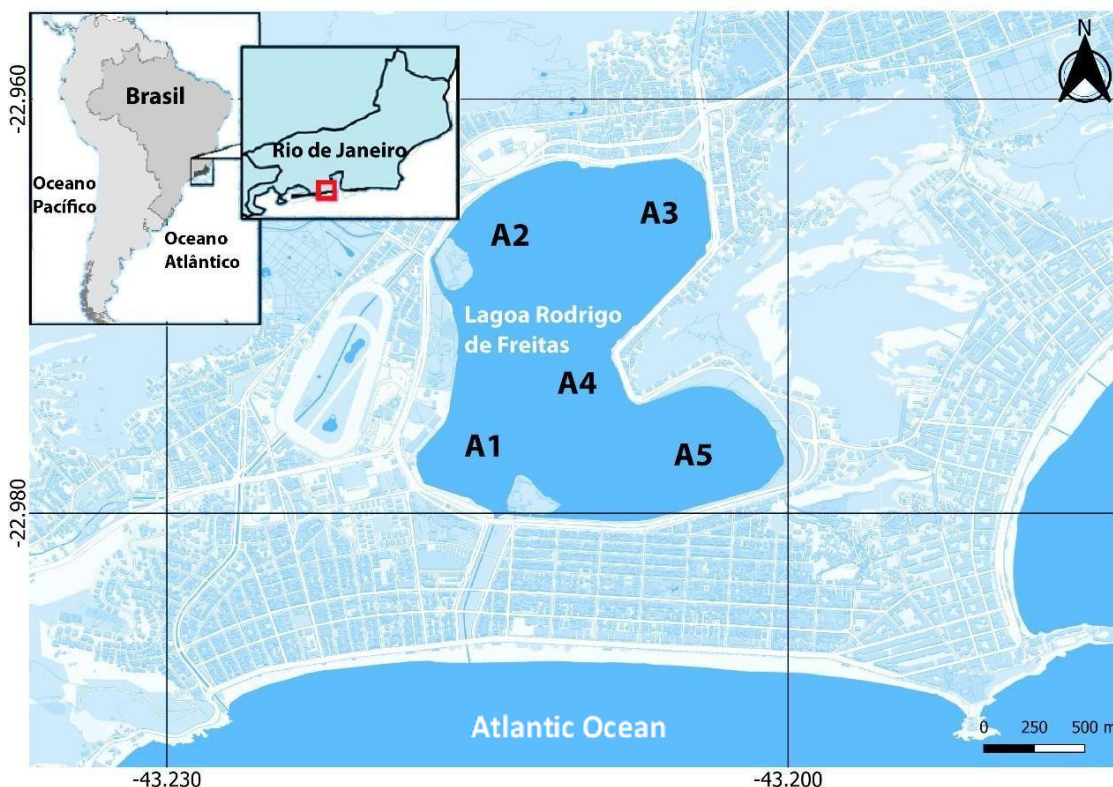


Figura 1: Localização da Lagoa Rodrigo de Freitas no Rio de Janeiro, Brasil, e delimitação das cinco áreas de amostragem (A1 a A5) utilizadas para os levantamentos de peixes realizados em 2023.

Amostragem

Foram realizadas quatro campanhas amostrais sazonais ao longo do ano de 2023, abrangendo os períodos de verão (março e maio) e inverno (setembro e novembro). A área de estudo foi estratificada em cinco estações amostrais (Figura 1), seguindo metodologia adaptada de Andreatta (2012) e Cutrim et al., (2025). Em cada estação, aplicou-se um protocolo padronizado composto por: 5 lances de tarrafa com três malhas distintas; 0,5 mm; 15 mm e 25 mm e 2 lances de rede malha 35 mm entre nos opostos, com 15 panos de rede (100 m cada) e 3,5 m de altura. Os exemplares coletados (licença SISBIO #85777-1) foram acondicionados em sacos plásticos com a devida identificação, armazenados em uma caixa térmica com gelo e transportados ao laboratório Biologia do Nécton e Ecologia Pesqueira - ECOPESCA para triagem e identificação taxonômica segundo Figueiredo e Menezes (1978, 1980, 2000); Menezes e Figueiredo (1980, 1985). Cada indivíduo foi submetido à biometria, com mensuração de peso (balança de precisão $\pm 0,01$ g) e comprimento total (ictiômetro, precisão 0,1 cm).

Os parâmetros físico-químicos da água foram mensurados *in situ* utilizando uma sonda multiparâmetro (Hydrolab HL7), com registro das variáveis: concentração de clorofila-a (mg/L^{-1}), condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}^{-1}$), salinidade, sólidos totais dissolvidos - TDS (g/L^{-1}), temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) e oxigênio dissolvido (mg/L^{-1}). A transparência da coluna d'água foi determinada através do método do disco de Secchi.

As amostras de musculo de peixe foram extraídas da parte dorsal de cada indivíduo (1g) com o auxílio de um bisturi (total de 235 amostras), lavadas com água destilada, armazenadas em criotubos e congeladas a -20 °C (24h) para posterior processo de liofilização (48h) e tratamento para análise no laboratório de Radioecologia e Alterações Ambientais – LARA da Universidade Federal Fluminense - UFF. As amostras liofilizadas foram maceradas, pesadas com o auxílio de uma balança analítica de precisão (Metler Toledo XP6), armazenadas em capsulas de estanho e analisadas em um espectômetro de massa acoplado a um analisador elemental. Os resultados serão expressos na notação padrão δ baseada em padrões internacionais (Pee Dee Belemnite para $\delta^{13}\text{C}$ e N_2 no ar para $\delta^{15}\text{N}$) (PETERSON e FRY, 1987), seguindo a fórmula: $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{amostra}} / R_{\text{padrão}}) - 1] \times 100$ (em ‰), onde X é ^{13}C ou ^{15}N e R é a razão correspondente, $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ ou $^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$. A precisão experimental, baseada no desvio padrão de medidas repetidas de um padrão interno de laboratório foi $<0,11\text{‰}$ para $\delta^{15}\text{N}$ e $<0,04\text{‰}$ para $\delta^{13}\text{C}$.

Análises

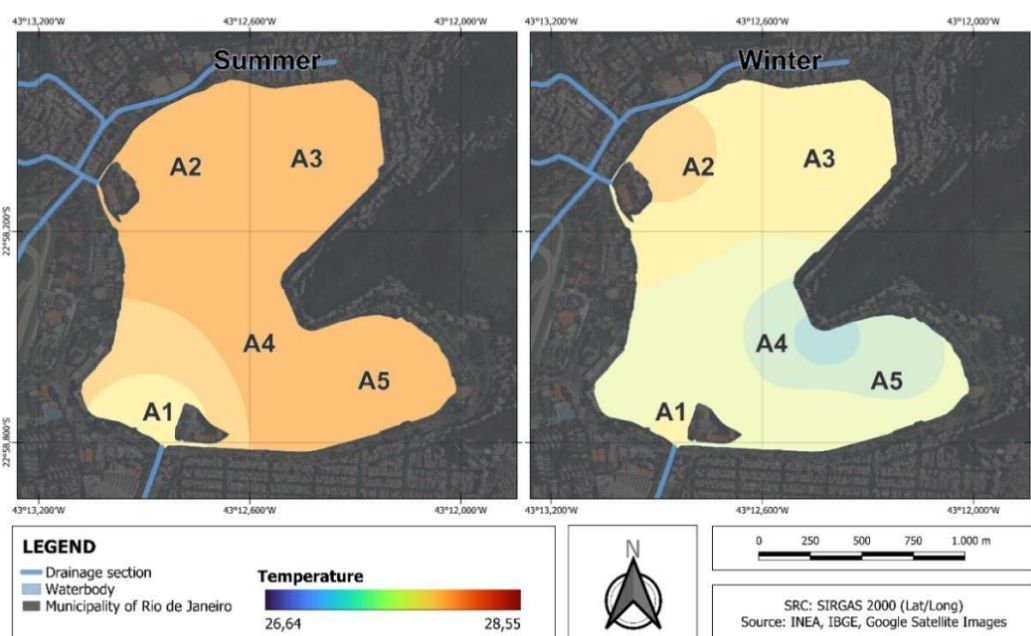
Foram calculados as médias e o desvio padrão de cada espécie para cada estação. Os valores obtidos geraram biplots para avaliar a posição de cada guilda e espécie no ecossistema lagunar da LRF. Para avaliar diferenças nas variáveis ambientais entre estações do ano (verão e inverno) e locais de amostragem, utilizou-se a análise PERMANOVA (Anderson, 2001), com matriz de dissimilaridade baseada em distância Euclidiana e 9999 permutações. Adicionalmente, uma Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para reduzir a dimensionalidade dos dados e padrão = 1) para garantir comparabilidade. A significância estatística foi considerada para $p < 0,05$ em todos os testes.

A análise KUD (*Kernel Utilization Densities*) foi utilizada para avaliar o nicho isotópico das espécies, através do pacote rKIN (Eckrich et al., 2019) possibilitando a comparação dos valores isotópicos de todas as espécies amostradas entre as estações verão e inverno. Assumimos que a sobreposição das KUD (*Kernel Utilization Densities*) fornece uma estimativa da sobreposição de nicho isotópico entre as estações. O tamanho do nicho e a sobreposição são reportados para os contornos de 50% e 75% das KUD que representam as áreas centrais de maior densidade (50% = núcleo mais restrito; 75% = área mais abrangente). Para contornar a depleção do ^{13}C ocasionado pelos lipídeos, valores de $\delta^{13}\text{C}$ de amostras com razão C:N $> 3,5$ foram normalizados usando equações específicas (Post et al. 2007, Logan et al. 2008, Hoffman & Sutton 2010) a fim de evitar interpretações incorretas a respeito da alimentação dessas espécies nos valores isotópicos do carbono ($\delta^{13}\text{C}$).

Resultados

A análise PERMANOVA, indicou diferenças estatisticamente significativas entre as estações do ano (verão vs inverno) (Pseudo-F = 30,98; $p = 0,0082$), demonstrando uma clara influência sazonal sobre as variáveis ambientais avaliadas. Por outro lado, não foram detectadas diferenças significativas entre os locais de amostragem (Pseudo-F = 1,03; $p = 0,4674$), sugerindo uma relativa homogeneidade espacial ao longo da lagoa para os parâmetros físicos e químicos analisados. A PERMANOVA aplicada a cada variável ambiental separadamente indicou diferenças significativas apenas entre as estações do

ano, sem efeito significativo entre os locais de amostragem. Os resultados mostraram que a temperatura (Pseudo-F = 14,45; $p = 0,03$) e a transparência da água (Pseudo-F = 50,92; $p < 0,05$) foram significativamente maiores durante o verão, enquanto a salinidade (Pseudo-F = 3391,2; $p < 0,05$), o oxigênio dissolvido (Pseudo-F = 29,48; $p < 0,05$) e a concentração de clorofila-a (Pseudo-F = 17,16; $p = 0,02$) apresentaram valores mais elevados no inverno (Fig. 2). Esses padrões sazonais nas variáveis ambientais foram também evidenciados pela análise de componentes principais (PCA), que apontou um claro gradiente entre as amostras das duas estações. Os dois primeiros componentes explicaram 97,1% da variação total dos dados, sendo o PC1 responsável por 83,1% e o PC2 por 13,9%. O PC1 refletiu um gradiente ambiental marcado pela correlação positiva de temperatura e transparência associado as amostras de verão e correlação negativa de salinidade, oxigênio dissolvido e clorofila associado as amostras de inverno. O PC2 destacou principalmente um contraste entre temperatura ($r = -0,73$) e clorofila ($r = -0,53$) (Fig. 3). A distribuição das amostras no espaço dos componentes indicou um claro padrão de separação entre estações do ano, com as amostras de maior temperatura e transparência (escores positivos no PC1) contrastando com aquelas de maior salinidade, oxigênio dissolvido e clorofila (escores negativos no PC1). Esses resultados corroboram os achados da PERMANOVA, reforçando a influência das variações sazonais sobre as condições ambientais da área de estudo



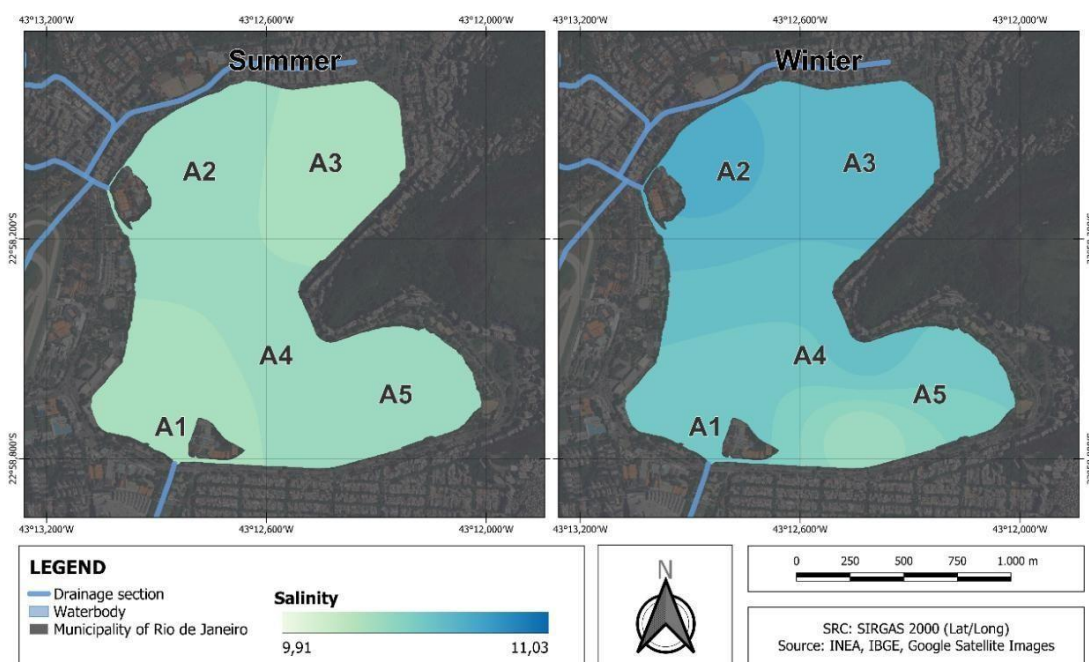


Figura 2. Mapa de calor representando os gradientes de temperatura e salinidade na Lagoa Rodrigo de Freitas, comparando cinco áreas de amostragem (A1 a A5) durante os períodos de inverno e verão. QGIS Development Team. (2025).

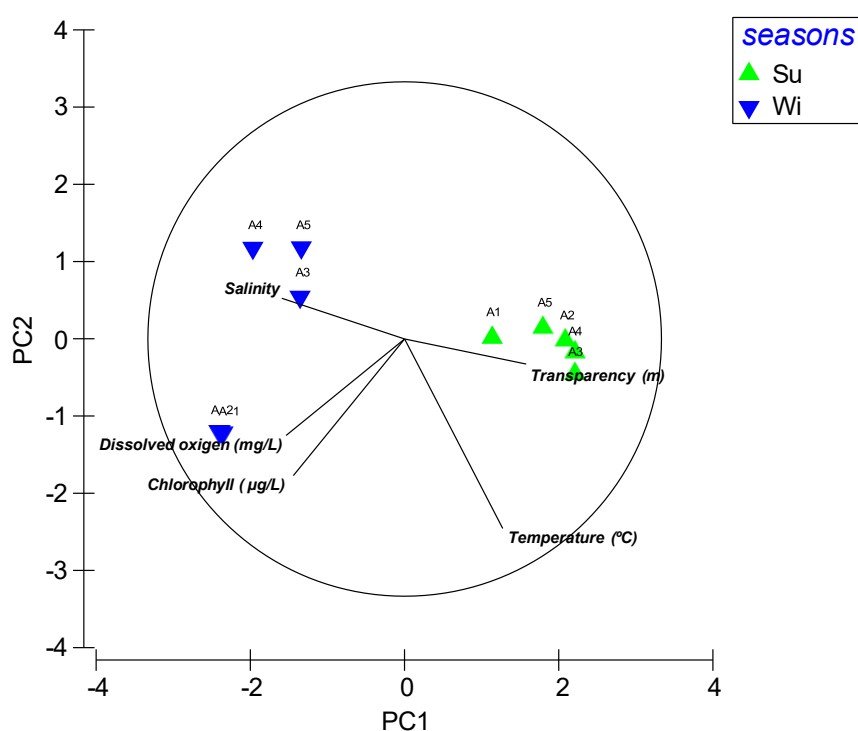


Figura 3. Análise de Componentes Principais (PCA) baseada em variáveis ambientais (temperatura, salinidade, transparência, oxigênio dissolvido e clorofila-a) nas diferentes estações do ano na lagoa Rodrigo de Freitas, RJ. As setas indicam a correlação das variáveis com os eixos principais (PC1 e PC2). Os triângulos verdes representam as amostras coletadas no verão, enquanto os triângulos azuis correspondem às amostras do inverno.

Foram analisadas 29 espécies de peixes, 3 de crustáceos, 1 de bivalve e 3 fontes primárias (fitoplâncton, folhas de mangue e *Ruppia maritima*). Foram calculados os valores médios, mínimos, máximos e o desvio padrão de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para cada grupo (Tabela 1). Algumas espécies apresentaram poucos indivíduos amostrados, o que pode limitar a interpretação da variabilidade isotópica intraespecífica.

Tabel 1: Lista das espécies amostradas na LRF com os dados de abundância (N) média, amplitude e desvio padrão (SD) de carb ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$).

Species	N	δ13C				δ15N			
		Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
Producers									
Plankton	5	-38.96	-42	-35.80	3.22	2.28	1.63	3.13	0.66
Mangroove leaf	4	-32.75	-42.3	-10.57	11.25	4.22	-1.27	9.65	4.45
<i>Ruppia maritima</i>	1	-19.58	-	-	-	8.59	-	-	-
Bivalve									
<i>Mytilopsis leucophaeata</i>	3	-22.9	-23.35	-22.36	0.5	6.82	5.82	7.69	0.94
Crustacean									
<i>Callinectes sapidus</i>	4	-19.29	-18.3	-20.81	1.16	11.41	10.5	12.7	1.03
<i>Callinectes ornatos</i>	1	-19.36	-	-	-	10.54	-	-	-
<i>Farfantepenaeus paulensis</i>	3	-17.56	-16.92	-18.60	0.9	13.03	11.23	14.30	1.59
Peixes									
<i>Anchoa januaria</i>	10	-23.17	-26.36	-20.40	2.27	12.44	8.26	19.16	3.68
<i>Atherinella brasiliensis</i>	8	-21.46	-25.43	-17.17	3.24	13.29	9.33	16.14	2.57
<i>Awaous tajasica</i>	1	-16.33	-	-	-	12.54	-	-	-
<i>Brevoortia aurea</i>	20	-19.74	-21.43	-19.02	0.58	12.08	9.95	16.61	2.10
<i>Caranx hippos</i>	2	-21.56	-21.84	-21.28	0.39	14.31	12.65	15.96	2.34
<i>Caranx latus</i>	1	-19.14	-19.14	-19.14	0.00	13.51	13.51	13.51	0.00
<i>Centropomus parallelus</i>	1	-17.24	-	-	-	13.50	-	-	-
<i>Centropomus pectinatos</i>	3	-18.62	-19.96	-17.90	1.17	14.14	13.88	14.37	0.25
<i>Cetengraulis edentulus</i>	2	-21.34	-21.88	-20.81	0.76	11.87	10.69	13.04	1.66
<i>Diapterus auratus</i>	7	-21.41	-23.29	-20.77	0.92	12.22	10.95	15.05	1.38
<i>Diapterus rhombeus</i>	2	-22.01	-22.17	-21.84	0.24	10.66	10.41	10.90	0.34
<i>Diplodus argenteus</i>	9	-21.56	-22.65	-19.50	1.01	12.65	11.51	15.42	1.20
<i>Elops smithi</i>	4	-17.89	-20.49	-16.04	1.92	13.72	12.14	14.34	1.06
<i>Eucinostomos argenteus</i>	5	-18.07	-22.19	-15.99	2.56	13.15	11.01	17.04	2.30
<i>Eucinostomos gula</i>	2	-20.04	-21.13	-18.95	1.54	14.42	13.76	15.09	0.94
<i>Geophagus brasiliensis</i>	18	-20.56	-22.34	-15.52	1.90	15.65	10.09	19.28	3.17
<i>Hemiramphus brasiliensis</i>	1	-16.03	-	-	-	13.27	-	-	-
<i>Jenynsia lineata</i>	13	-16.11	-22.82	-13.81	3.07	14.20	12.81	18.04	1.67
<i>Micropogonias furnieri</i>	10	-21.72	-24.21	-20.65	0.99	12.66	10.42	14.29	1.51
<i>Mugil curema</i>	3	-19.94	-20.29	-19.54	0.38	9.71	9.41	10.18	0.41
<i>Mugil liza</i>	17	-19.89	-22.92	-16.58	1.60	12.74	8.05	18.41	3.21
<i>Oligoplites saurus</i>	1	-18.84	-	-	-	13.89	-	-	-
<i>Opstonema oglinum</i>	10	-20.14	-20.60	-19.40	0.32	12.32	11.50	14.91	1.11
<i>Oreochomis niloticus</i>	22	-18.30	-21.99	-15.92	1.61	15.42	9.75	20.45	2.45
<i>Orthopristes ruber</i>	8	-20.37	-20.96	-19.83	0.43	13.57	11.59	16.33	1.85

<i>Paralichthys orbignyanus</i>	1	-17.51	-	-	-	14.99	-	-	-
<i>Phalloptychus januarius</i>	14	-18.05	-19.28	-16.24	0.99	12.49	10.38	14.66	1.54
<i>Poecilia vivipara</i>	10	-17.28	-20.36	-15.16	1.69	12.35	10.94	16.21	2.01
<i>Sardinella brasiliensis</i>	1	-20.86	-	-	-	10.99	-	-	-
<i>Trinectes paulistanus</i>	2	-16.67	-17.49	-15.85	1.16	12.50	11.01	13.98	2.10

Os valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ evidenciam uma estrutura trófica complexa na Lagoa Rodrigo de Freitas, refletindo a contribuição de diferentes fontes de carbono e uma ampla gama de níveis tróficos. O fitoplâncton apresentou os valores mais empobrecidos de $\delta^{13}\text{C}$ (-38,96‰), indicando uma base autotrófica típica de produção pelágica, i.e., refletindo a produção primária por microalgas da coluna d'água (pelágicas), distinta de fontes bentônicas ou terrestres. Em contraste, a vegetação aquática submersa (*Ruppia maritima*) exibiu $\delta^{13}\text{C}$ mais enriquecido (-19,58‰), enquanto as folhas de mangue mostraram valores intermediários (-32,75‰), sugerindo pelo menos duas vias principais de entrada de carbono no sistema: uma pelágica e outra de origem terrestre.

O bivalve *Mytilopsis leucophaeata* apresentou $\delta^{13}\text{C}$ de -22,9‰ e $\delta^{15}\text{N}$ de 6,82‰, indicando forte dependência da matéria particulada, principalmente de origem fitoplanctônica. Entre os crustáceos, *Callinectes* spp. ($\delta^{13}\text{C}$ -19,3‰; $\delta^{15}\text{N}$ 11,04‰) e *Farfantepenaeus paulensis* ($\delta^{13}\text{C}$ -17,56‰; $\delta^{15}\text{N}$ 13,03‰) ocupam níveis tróficos superiores, condizentes com hábitos onívoros.

A assembleia de peixes revelou uma clara estratificação trófica. Os Mugilídeos, com $\delta^{13}\text{C}$ médio de -19,94‰ e $\delta^{15}\text{N}$ de 12,74‰, refletem dieta baseada em detritos e algas, típica de consumidores de baixo nível trófico. Por outro lado, espécies onívoras, como o *Geophagus brasiliensis* (com assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ -20,56‰ e $\delta^{15}\text{N}$ 15,65‰) e a *Oreochromis niloticus* ($\delta^{13}\text{C}$ -18,3‰; $\delta^{15}\text{N}$ 15,42‰), exibiram níveis de $\delta^{15}\text{N}$ mais altos do que os observados em certos peixes carnívoros. Esse padrão sugere que essas espécies podem estar assimilando recursos alimentares enriquecidos em ^{15}N , provavelmente vinculados a fontes de matéria orgânica derivada de atividades urbanas, como esgoto ou efluentes antropogênicos.

Os predadores de topo, representados pelos robalos (*Centropomus* spp.), exibiram os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ (13,50 a 14,14‰), confirmando sua posição no ápice da teia trófica local. Espécies como *Awaous tajasica* (-16,33‰) e *Trinectes paulistanus* (-16,67‰) apresentaram $\delta^{13}\text{C}$ mais enriquecidos que os demais peixes analisados, sugerindo a utilização de fontes alimentares distintas ou associação a micro-habitats específicos dentro da lagoa. De forma geral, a ampla variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre grupos funcionais e espécies indica um sistema com múltiplas fontes de carbono, fortes pressões antrópicas e elevada plasticidade trófica entre os consumidores.

Os valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ agrupados em guildas tróficas reforçam a complexidade trófica observada na Lagoa Rodrigo de Freitas, com variações sazonais e funcionais que refletem diferentes fontes de carbono e níveis tróficos entre os consumidores (Tab. 2). Durante o inverno, por exemplo, os plânctívoros exibem valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -22,58‰ e $\delta^{15}\text{N}$ próximo a 11,15‰, confirmando sua dependência da produção pelágica, alinhada ao fitoplâncton com valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais empobrecidos descritos anteriormente. Já os detritívoros e herbívoros apresentam $\delta^{13}\text{C}$ mais enriquecidos (em torno de -20‰), consistente com a utilização de matéria orgânica bentônica e vegetação aquática, como a *Ruppia maritima*, sugerindo múltiplas vias de entrada de carbono no sistema. Os onívoros e carnívoros, tanto no inverno quanto no

verão, apresentam valores mais elevados de $\delta^{15}\text{N}$ (entre 13 e 15‰), refletindo sua posição em níveis tróficos superiores e consumo de recursos enriquecidos, possivelmente influenciados por fontes antrópicas, conforme observado para espécies como *Geophagus brasiliensis* e *Oreochromis niloticus*. A variação sazonal nos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$, que tendem a ser menos empobrecidos no verão (-18 a -20‰) para os consumidores mais altos na cadeia, pode indicar mudanças nas fontes alimentares e disponibilidade de recursos, reforçando a plasticidade trófica e a dinâmica complexa dos consumidores da lagoa. Deste modo, os dados isotópicos específicos das diferentes guildas tróficas confirmam o cenário multifacetado descrito, com múltiplas fontes de carbono (pelágicas, bentônicas e terrestres) e uma rede alimentar estruturada em níveis tróficos distintos, submetida a influências naturais e antrópicas que moldam a ecologia trófica da lagoa.

Tabela 2: Abundância (N), média, amplitude e desvio padrão (SD) de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) para as cinco guildas nas estações verão e inverno.

Trophic guild	N	$\delta^{13}\text{C}$				$\delta^{15}\text{N}$			
		Mean	Min	Max	SD	Mean	Min	Max	SD
Summer									
Planktivore	14	-20,5255	-21,1085	-19,9425	0,704129	13,24789	11,6798	14,81597	2,285693
Herbivore	3	-19,877	-	-	0,416465	12,83759	-	-	1,803403
Detritivore	1	-16,5824	-	-	-	10,54765	-	-	-
Omnivore	44	-18,318	-19,5708	-16,2328	2,531819	13,97623	12,55461	15,42808	2,626079
Carnivore	8	-18,1094	-	-	1,233656	14,07262	-	-	0,292258
Winter									
Planktivore	19	-22,5754	-25,2334	-19,9174	0,766923	11,14725	10,07172	12,22277	2,511581
Herbivore	7	-20,2584	-	-	-	12,10208	-	-	-
Detritivore	19	-20,0737	-	-	-	12,38035	-	-	-
Omnivore	76	-20,393	-23,342	-16,0338	1,255085	13,69511	11,86886	15,76021	2,427311
Carnivore	17	-19,6258	-21,7167	-16,9491	1,334038	13,184	12,65842	13,5632	1,757912

A Figura 4 apresenta a distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ dos principais produtores primários e consumidores aquáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF), refletindo as distintas fontes de carbono e os diferentes níveis tróficos presentes no ecossistema. Entre os produtores primários, destacam-se o fitoplâncton e as folhas de mangue, ambos representados em verde, com valores mais empobrecidos de $\delta^{13}\text{C}$, variando de aproximadamente -38‰ a -33‰. Esses valores indicam a predominância de carbono de origem autóctone pelágica (fitoplâncton) e alóctone terrestre (folhas de mangue), respectivamente. A vegetação submersa *Ruppia maritima* (RupMar), também representada em verde, apresenta valores mais enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ (~ -19‰), consistentes com sua origem bentônica e a fixação de carbono a partir da coluna d'água. No grupo dos consumidores primários, destaca-se o bivalve *Mytilopsis leucophaeata* (MytLeu), representado em roxo, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ intermediários, indicando sua alimentação baseada principalmente na matéria particulada em suspensão, com forte contribuição fitoplanctônica. Além desses grupos, observa-se na um agrupamento mais concentrado de pontos na faixa de $\delta^{13}\text{C}$ entre -24‰ e -14‰ e $\delta^{15}\text{N}$ entre 11‰ e 16‰, composto principalmente pela ictiofauna e outros consumidores de níveis tróficos superiores (Figura 4A). Devido à sobreposição desses dados, apresentamos uma ampliação desta área, permitindo uma melhor visualização e interpretação dos padrões tróficos entre os consumidores (Figura 4B).

Na Figura 4B, observa-se uma clara diferenciação entre os grupos tróficos representados por diferentes cores. Os consumidores em amarelo, que incluem as famílias *Cichlidae* (Cic), *Engraulidae* (Eng), *Sparidae* (Spa), *Mugilidae* (Mug), *Haemulidae* (Hae), *Gerreidae* (Ger), *Anablepidae* (Ana), *Poeciliidae* (Poe) e *Portunidae* (Por), apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ intermediários, indicando uma dieta variada com contribuição de fontes de carbono tanto bentônicas quanto pelágicas. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ desses grupos variam entre 12‰ e 15‰, sugerindo sua ocupação de níveis tróficos baixos a intermediários, compatíveis com hábitos alimentares que incluem detritos, macroinvertebrados bentônicos e pequenos crustáceos. Os consumidores destacados em vermelho, como *Centropomidae* (Cen), *Carangidae* (Car), *Elopidae* (Elo), *Sciaenidae* (Sci) e *Achiridae* (Ach), apresentam os valores mais elevados de $\delta^{15}\text{N}$, variando entre 13‰ e 16‰. Esse padrão reflete sua posição em níveis tróficos superiores, consistentes com a dieta piscívora ou carnívora predominante nesses grupos. O ponto azul representa a família *Chupeidae* (Clu), que ocupa posição intermediária tanto em $\delta^{13}\text{C}$ quanto em $\delta^{15}\text{N}$, sugerindo uma dieta dominada por matéria particulada da coluna d'água e/ou zooplâncton. De maneira geral, a distribuição dos consumidores evidencia a estrutura trófica da ictiofauna da LRF, caracterizada por uma ampla amplitude isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ (aproximadamente -24‰ a -14‰) e $\delta^{15}\text{N}$ (entre 11‰ e 16‰) (Figura 4B). Esse padrão indica a existência de uma rede alimentar complexa, sustentada por múltiplas fontes de carbono e por uma clara diferenciação entre os níveis tróficos, desde consumidores primários até predadores de topo. A sobreposição parcial entre alguns grupos também sugere um certo grau de compartilhamento de nicho ou de sobreposição trófica entre espécies com dietas generalistas ou oportunistas.

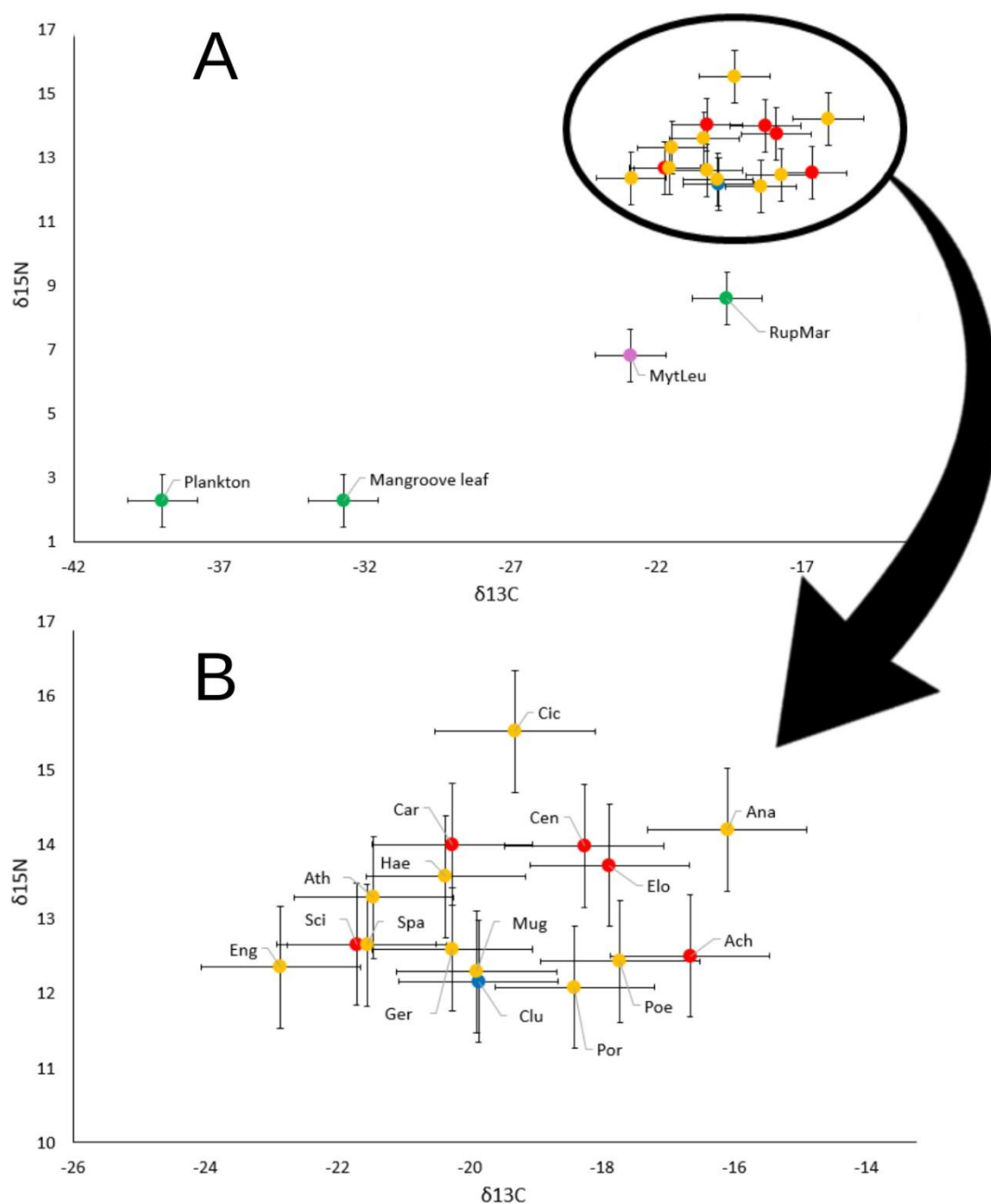


Figura 4. Distribuição dos valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ dos principais produtores primários e consumidores aquáticos da Lagoa Rodrigo de Freitas (LRF) (A) e (B) Ampliação da área correspondente majoritariamente à ictiofauna, com melhor visualização da distribuição dos consumidores em diferentes níveis tróficos. Verde: RupMar – *Ruppia maritima*; Plankton; Mangroove leaf. Roxo: MytLeu – *Mytilus leucophaeata*. Amarelo: Cic – *Cichilidae*; Eng – *Engraulidae*; Spa – *Sparidae*; Mug – *Mugilidae*; Hae – *Haemulidae*; Ger – *Gerreidae*; Ana – *Anablepidae*; Poe – *Poeciliidae*; Por – *Portunidae*. Vermelho: Cen – *Centropomidae*; Car – *Carangidae*; Elo – *Elopidae*; Sci – *Sciaenidae*; Ach – *Achiridae*. Azul: Clu – *Clupeidae*.

Para detalhar a estrutura trófica da ictiofauna da Lagoa Rodrigo de Freitas, a Figura 5 apresenta um biplot com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ organizados por guildas alimentares. Na Figura 5A, observa-se que as espécies carnívoras exibem os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$, indicando sua posição nos níveis tróficos superiores. Além disso, há uma relativa

dispersão nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, sugerindo o uso de diferentes fontes de carbono por essas espécies predadoras. Na Figura 5B, as espécies onívoras apresentam valores intermediários de $\delta^{15}\text{N}$, refletindo dietas variadas que incluem tanto recursos de origem animal quanto vegetal. A amplitude observada nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ sugere uma exploração diversificada de habitats e fontes de carbono, o que pode indicar flexibilidade trófica desse grupo. A Figura 5C destaca os detritívoros (representados em marrom) e os planctívoros (em verde). Os detritívoros concentram-se nas menores razões de $\delta^{15}\text{N}$ e mostram valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais enriquecidos, coerentes com o consumo de material particulado sedimentar e detritos associados ao fundo da lagoa. Já os planctívoros apresentam $\delta^{15}\text{N}$ igualmente baixos, porém com valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais depletados, caracterizando uma forte dependência da produção planctônica como principal fonte de carbono. Essa distribuição evidencia a separação trófica entre as guildas e reforça os padrões de especialização e sobreposição de nichos alimentares na ictiofauna local.

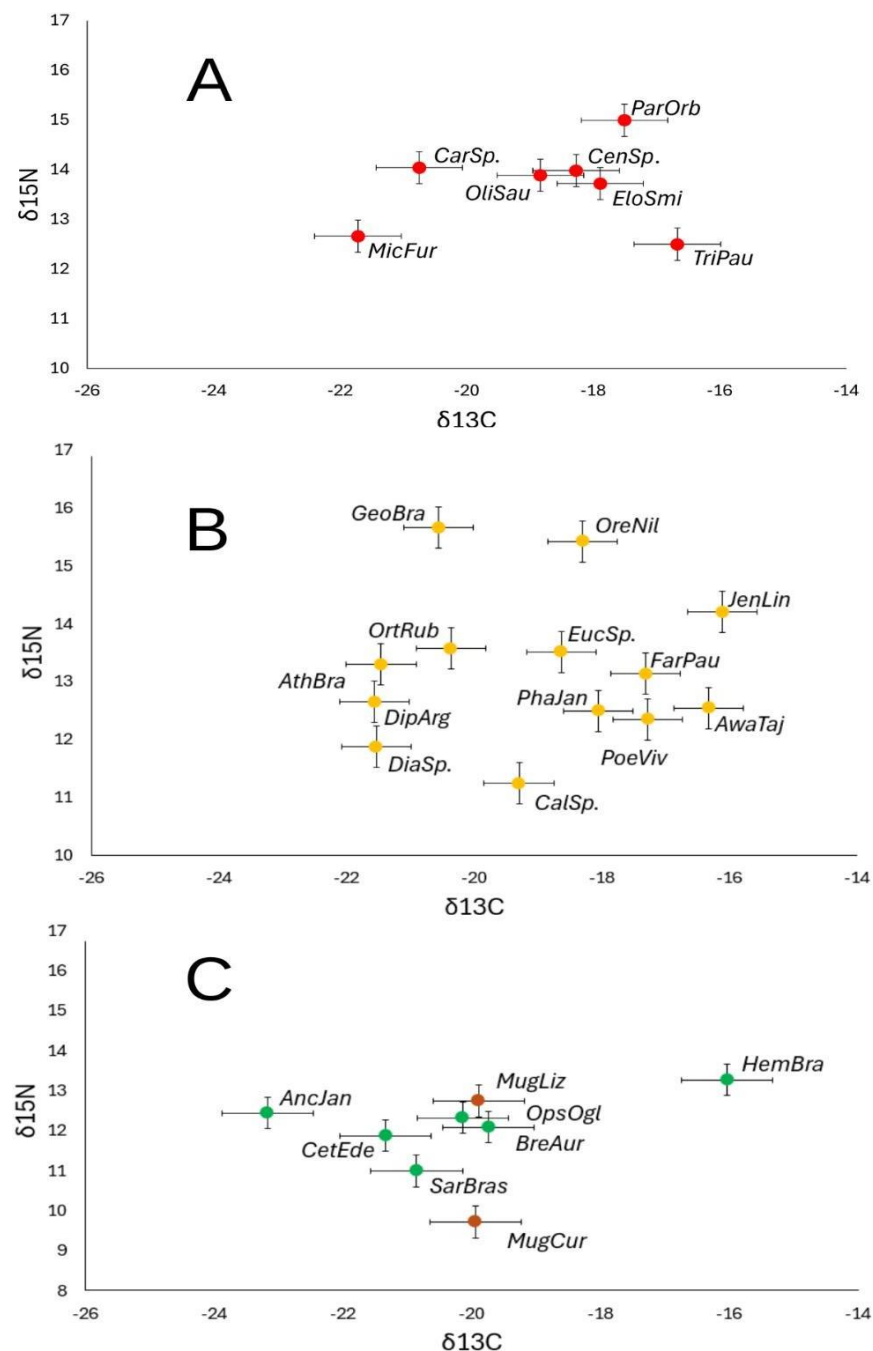


Figura 5: Biplot dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ separados por guildas. A: carnívoros (vermelho), onde: *MicFur* – *Micropogonias furnieri*; *TriPau* – *Trinectes paulistanus*; *OliSau* – *Oligoplites saurus*; *EloSmi* –

Elops smithi; CarSp. – *Cranx sp.* (*Caranx hippos* e *Caranx latus*); CenSp. – *Centropomus sp.* (*Centropomus parallelus* e *Centropomus pectinatus*); ParOrb – *Paralichthys orbignyanus*. B: onívoros (amarelo), onde: CalSp. – *Callinectes sp.* (*Callinectes sapidus* e *Callinectes ornatos*); DiaSp. – *Diapterus sp.* (*Diapterus auratus* e

Diapterus rhombeus); *PoeViv* – *Poecilia vivipara*; *DipArg* – *Diplodus argenteus*; *AwaTaj* – *Awous tajacica*; *PhaJan* – *Phaloptychus januaris*; *AthBra* – *Atherinella brasiliensis*; *FarPau* – *Farfantepenaeus paulensis*; *OrtRub* – *Orthopristes rubra*; *EucSp.* – *Eucinostomus sp.* (*Eucinostomus gula* e *Eucinostomus argenteus*); *JenLin* – *Jenynsia lineata*; *OreNil* – *Oreochromis niloticus*; *GeoBra* – *Geophagus brasiliensis*. C: Verde, herbívoro: *SarBra* – *Sardinella brasiliensis*; *CetEde* – *Cetengraulis edentulus*; *BreAur* – *Brevortia aurea*; *OpsOgl* – *Opstionema oglinum*; *AncJan* – *Anchoa januaria*; *HemBra* – *Hemiramphus brasiliensis*; marrom, detritívoro: *MugCur* – *Mugil curema* e *MugLiz* – *Mugil liza*.

Essa separação trófica evidenciada na Figura 5 também se reflete nas variações sazonais dos nichos isotópicos dos consumidores (Figura 6). O biplot dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, acompanhado das estimativas Kernel com seus respectivos intervalos de confiança (50%, 75% e 95%), permite visualizar de forma clara as diferenças na distribuição isotópica entre as estações de inverno e verão. Observa-se que, durante o verão, os consumidores apresentaram uma leve expansão na amplitude isotópica, especialmente em direção a valores mais enriquecidos de $\delta^{15}\text{N}$, sugerindo uma elevação do nível trófico médio da comunidade. No eixo $\delta^{13}\text{C}$, os consumidores de ambas as estações permanecem distribuídos majoritariamente entre -25‰ e -15‰, indicando certa consistência na origem das fontes de carbono ao longo do ano. Ainda assim, nota-se uma tendência de deslocamento das isotopias de verão para valores ligeiramente mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$ em comparação ao inverno, o que pode indicar variações na base da cadeia alimentar ou na seletividade trófica dos consumidores. As áreas de sobreposição entre os intervalos de confiança das estações, principalmente nas faixas de 75% e 95%, indicam que, apesar das diferenças sazonais, há manutenção de uma estrutura trófica relativamente estável ao longo do ano. Cabe destacar que os dados de produtores primários para o verão foram perdidos durante o processamento das amostras. No entanto, como a análise aqui apresentada é focada exclusivamente nos consumidores, essa limitação não compromete a interpretação das variações sazonais nos padrões de nicho isotópico.

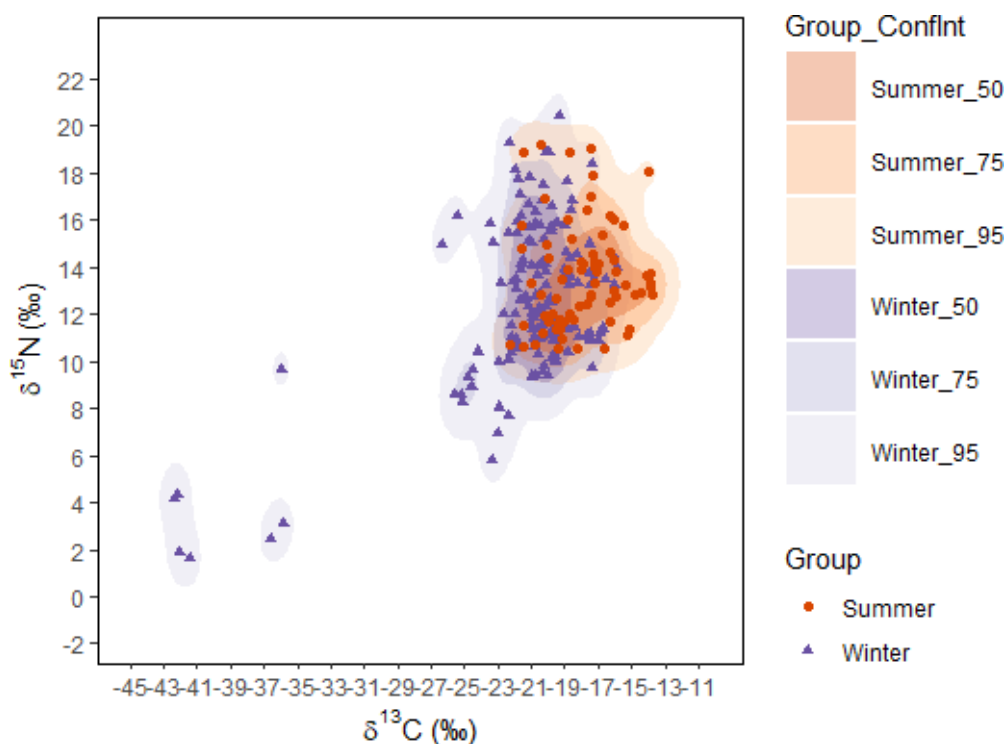


Figura 6. Biplot dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para teia trófica da lagoa Rodrigo de Freitas, RJ, durante o verão e o inverno. As áreas sombreadas representam as estimativas Kernel de densidade de nicho isotópico com intervalos de confiança de 50%, 75% e 95% para cada estação.

Discussão

A análise integrada dos dados ambientais e isotópicos revelou uma forte influência sazonal nas condições físicas e químicas da Lagoa Rodrigo de Freitas, evidenciando um padrão claro de variação entre as estações de verão e inverno, confirmado pelas análises multivariadas. Essa dinâmica sazonal molda a estrutura trófica da comunidade ictiofaunística, que se mostra complexa e estratificada. De forma consistente com os achados de Cruz et al. (2018), observamos que a composição das espécies e a estrutura da teia alimentar em ecossistemas lagunaressão fortemente influenciadas por gradientes ambientais, especialmente pela variação da salinidade. Esse gradiente atua como um filtro ambiental que separa as espécies conforme suas tolerâncias fisiológicas, repercutindo diretamente na organização trófica da comunidade. Além disso, como destacado por Davias et al. (2011) em estudos na Baía de Chesapeake (EUA), a interpretação das razões isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em consumidores aquáticos em sistemas estuarinos requer uma compreensão integrada de múltiplos fatores, incluindo a salinidade, o uso do solo no entorno, a fidelidade ao habitat (por exemplo, manguezais, vegetação ripária ou submersa, áreas urbanizadas). Nossos resultados corroboram essa complexidade, evidenciando que as assinaturas isotópicas dos peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas refletem não apenas o regime sazonal e a variabilidade físico-química da água, mas também a influência de diferentes fontes de carbono, associadas tanto ao contexto urbano quanto à heterogeneidade dos microhabitats disponíveis no sistema. Além disso, é fundamental reconhecer que outras variáveis ambientais, como as avaliadas no presente estudo, também podem influenciar significativamente os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos consumidores aquáticos. Estudos como o de Patterson e Carmichael et al. (2018), realizados com ostras, demonstraram que condições ambientais adversas, especialmente baixos níveis de oxigênio dissolvido, podem afetar o metabolismo dos organismos, alterando o fracionamento isotópico independentemente da composição da dieta. Esses efeitos resultam em modificações nos valores isotópicos, não diretamente atribuíveis às fontes alimentares, mas sim a respostas fisiológicas ao estresse ambiental. Nossos resultados sugerem que fenômenos semelhantes podem ocorrer na Lagoa Rodrigo de Freitas, reforçando a importância de considerar de forma integrada os efeitos da qualidade da água e das condições físico-químicas locais na interpretação das assinaturas isotópicas dos peixes.

A composição trófica, avaliada por meio dos isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$), indicou a existência de múltiplas vias de entrada de carbono na teia alimentar da Lagoa Rodrigo de Freitas, com contribuições de origens pelágicas, bentônicas e terrestres. O fitoplâncton se destacou como a principal base autotrófica da fração pelágica, enquanto a vegetação aquática submersa e a matéria orgânica derivada de manguezais evidenciaram aportes significativos das vias bentônicas e terrestres. Esses resultados são consistentes com a literatura, que reconhece o $\delta^{13}\text{C}$ como um marcador importante das fontes primárias de carbono na teia alimentar (Herman et al., 2000), refletindo a diferenciação entre produtores pelágicos e bentônicos. Além disso, como destacado por McMahon et al. (2013), os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ da biomassa de produtores e consumidores primários planctônicos (como o fitoplâncton e o zooplâncton herbívoro) tendem a responder rapidamente às flutuações nas condições ambientais, tornando-se linhas de base valiosas para a interpretação de processos tróficos. A transferência desses sinais isotópicos ao longo da teia alimentar, com os esperados enriquecimentos tróficos permitiu inferir de forma robusta as posições tróficas dos peixes

analisados. Conforme descrito por e Stephens et al. (2023), os incrementos de $\delta^{15}\text{N}$ entre os níveis tróficos (em média de 2,3 a 3,4‰) sustentam a distinção entre consumidores primários e secundários em nossos dados. Portanto, nossos achados reforçam que a estrutura trófica da ictiofauna da Lagoa Rodrigo de Freitas é o resultado da integração de múltiplas fontes de carbono e de processos de fracionamento isotópico associados tanto à posição trófica dos consumidores quanto às variações ambientais que afetam os produtores primários.

Mudanças nas guildas e nos nichos isotópicos ao longo do tempo, especialmente com base nos valores de carbono, eram esperadas devido às diferentes faixas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ observadas entre os consumidores. Estudos prévios indicam que variações espaciais e ambientais nas fontes de carbono geram assinaturas isotópicas distintas nas comunidades de peixes. Por exemplo, Bouillon et al. (2011) reportaram uma faixa de $\delta^{13}\text{C}$ entre -7,5 e -18,9‰ em estuários tropicais, enquanto De Rezende (2020), em uma lagoa hipersalina tropical, encontraram valores entre -11 e -16‰, evidenciando que espécies de diferentes guildas tróficas podem explorar fontes de carbono com origens e assinaturas isotópicas distintas. Em nossos resultados, a ampla variação de $\delta^{13}\text{C}$ entre os consumidores reflete a existência de múltiplas fontes de carbono e uma alta plasticidade trófica, com utilização simultânea de recursos pelágicos, bentônicos e terrestres ao longo do gradiente espacial da lagoa. Para o $\delta^{15}\text{N}$, os valores elevados registrados em espécies onívoras (*Oreochromis niloticus* e *Geophagus brasiliensis*), sugerem influência de fontes antrópicas de nitrogênio. Além disso, a amplitude relativamente pequena nos valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ entre as guildas predadoras de topo, como os robalos aponta para uma estrutura trófica comprimida, com espécies coexistentes ocupando posições tróficas próximas e apresentando alto grau de sobreposição isotópica, fenômeno semelhante ao descrito por Kucklick et al. (2016) para um estuário de águas rasas (Bulls Bay-localizado na costa da Carolina do Sul). Ademais, as diferenças sazonais nos valores isotópicos sugerem variações na disponibilidade e no uso das fontes alimentares ao longo das estações do ano.

Em síntese, este estudo evidenciou que as condições ambientais sazonais são determinantes para a organização da rede alimentar da ictiofauna da lagoa, que se caracteriza por múltiplas vias de entrada de carbono e por uma complexa interação entre pressões naturais e antrópicas. Tais resultados reforçam a importância de uma abordagem integrada para a compreensão, manejo e conservação de ecossistemas lagunares urbanos.

Considerações finais

Influência sazonal marcada: A Lagoa Rodrigo de Freitas apresenta forte influência sazonal nas condições físico-químicas da água, com diferenças significativas entre verão e inverno, afetando diretamente a estrutura trófica da ictiofauna.

Papel da salinidade como filtro ambiental: A variação espacial e temporal da salinidade atua como um importante filtro ambiental, organizando a composição de espécies e sua distribuição trófica, em concordância com padrões observados em outros sistemas lagunares.

Multiplicidade de fontes de carbono: A teia alimentar da lagoa é sustentada por múltiplas vias de entrada de carbono, com contribuições de fontes pelágicas (fitoplâncton), bentônicas (vegetação submersa) e terrestres (material alóctone de manguezais e áreas urbanas).

Resposta isotópica às condições ambientais: As assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos peixes refletem não apenas a origem das fontes alimentares, mas também as condições ambientais locais, como variações de salinidade, oxigênio dissolvido e possíveis efeitos de estresse fisiológico.

Estrutura trófica estratificada, porém, comprimida: A análise das razões isotópicas permitiu identificar uma estrutura trófica com diferenciação entre consumidores primários, secundários e predadores de topo. No entanto, a baixa amplitude de $\delta^{15}\text{N}$ entre os níveis superiores sugere uma estrutura trófica comprimida e com alto grau de sobreposição entre os predadores.

Evidências de aporte antrópico de nitrogênio: Espécies onívoras como *Oreochromis niloticus* e *Geophagus brasiliensis* apresentaram valores elevados de $\delta^{15}\text{N}$, indicando possível influência de fontes antrópicas de nitrogênio no sistema.

Variação temporal na dieta dos consumidores: As diferenças sazonais nas assinaturas isotópicas sugerem alterações no uso das fontes alimentares ao longo do ano, indicando uma plasticidade trófica que permite a adaptação da ictiofauna às mudanças ambientais.

Implicações para o manejo de ecossistemas urbanos: Os resultados reforçam a necessidade de abordagens integradas na gestão e conservação de ecossistemas lagunares urbanos, considerando as interações entre pressões naturais, antrópicas e a variabilidade ambiental local.

Referências

- Abrantes, K. G., Barnett, A., Bouillon, S. 2014. Stable isotope-based community metrics as a tool to identify patterns in food web structure in east African estuaries. *Functional Ecology*, 28, 270–282.
- Albertoni, E. F. et al.: Crescimento e fator de condição na fase juvenil de *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille) e *F. paulensis* (Pérez-Farfante) (Crustacea, Decapoda, Penaeidae) em uma lagoa costeira tropical do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 20, n. 3, p. 409-418, 2003.
- Albrecht, M. P., da Silva Reis, A., Neres-Lima, V., & Zandonà, E. (2021). Isótopos estáveis e outras ferramentas em estudos tróficos de peixes em riachos tropicais. *Oecologia Australis*, 25(2), 300-300.
- Alves, L.S., Ramos, V. V. A., Lobo, M. A. S., Lamego F. & Nepomuceno, A. 2021. Reconstrução da história do processo da ocupação urbana e da eutrofização em lagoas do leste fluminenses por registros sedimentares. In: Costa, M. R., Monteiro-Neto, C., Tubino, R. A. & Angelini, R. (eds.) *Pesca e sustentabilidade: Passado, presente e futuro Pesca e sustentabilidade: passado, presente e futuro*. Rio de Janeiro: Alexandre Honorato Duarte Ferreira.
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral ecology*, 26(1), 32-46.
- Anderson, M. J., Ellingsen, K. E. & McArdle, B. H. 2006. Multivariate dispersion as a measure of beta diversity. *Ecology letters*, 9(6), 683-693.
- Anderson, M. J., Gorley, R. N. & Clarke, K. R. 2008. PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods. *A Primer on Magnetohydrodynamics*, New Zealand, PRIMER-e.
- Andreata, J. V., Marca, A. G., Soares, C. L. & Santos, R. D. S. 1997. Distribuição mensal dos peixes mais representativos da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista brasileira de Zoologia*, 14, 121-134.
- Andreata, J. V., Oliveira, L. O., Meurer, B. C., Freret, N. V., Teixeira, D. E., Manzano, F. V. & Longo, M. M. 2004. Peixes pelágicos da Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, Brasil. *Estudos de Biologia*, 26(55).
- Andreata, J. V. 2012. Ictiofauna da lagoa Rodrigo de Freitas, estado do Rio de Janeiro: composição e aspectos ecológicos. *Oecologia Australis*, 16(3), 467-500.
- Anthony, A. J. et al.: 2009. Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. Atlantic and Gulf coast ecosystems. *Ecology and Society* 14, 8.
- Bearhop, S., Adams, C. E., Waldron, S., Fuller, R. A., & Macleod, H. 2004. Determining trophic niche width: A novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology*, 73(5), 1007– 1012. DOI:10.1111/j.0021-8790.2004.00861.x
- Benedito-Cecilio, E.; Araújo-Lima, C. A. R, M.; Forsberg, B. R.; BittencourtT, M. M.; Martinelli, L. A. C. Carbon sources of Amazonian fisheries. *Fisheries Management and Ecology*, 7: 1-10, 2000.
- Bond, N., Magoulick, D., & Fournier, R. (2021). Modelagem dos efeitos de perturbações nas estratégias de história de vida de peixes de riachos. *Oecologia*, 196, 413-425. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04941-8>.

Bouillon, S., Connolly, RM, & Gillikin, DP (2011). 7.07 Uso de isótopos estáveis para compreender teias alimentares e o funcionamento de ecossistemas em estuários. *Tratado sobre ciência estuarina e costeira*, 7.

Brito, E. F., Moulton, T. P., De Souza, M. L., & Bunn, S. E. 2006. Stable isotope analysis indicates microalgae as the predominant food source of fauna in a coastal forest stream, southeast Brazil. *Austral Ecology*, 31(5), 623–633. DOI:10.1111/j.1442-9993.2006.01610.x

Carvalho, D. R., Castro, D. M. P., Callisto, M., Chaves, A. J. de M., Moreira, M. Z., & Pompeu, P. S. 2019. Stable isotopes and stomach content analyses indicate omnivorous habits and opportunistic feeding behavior of an invasive fish. *Aquatic Ecology*, 53, 365–381

Clarke, K. R. & Gorley, R. N. 2006. *A Primer on Magnetohydrodynamics*, New Zealand, PRIMER-e.

Cloern, E.J. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, v. 210, 2001, p. 223-253.

Coelho, V. M. B.: Lagoa Rodrigo de Freitas: uma discussão centenária. Rio de Janeiro: Cidade Viva, 2016. 240 p.

Costa, M. R., *Pesca e sustentabilidade: Passado, presente e futuro Pesca e sustentabilidade: passado, presente e futuro*. Rio de Janeiro: Alexandre Honorato Duarte Ferreira. Livro SLLF

Cutrim, C. H.G., et al. 2025. Recursos Pesqueiros da Lagoa Rodrigo de Freitas: Guia Prático Ilustrado Santos (organizadores) – Curitiba: CRV. 246 p.

Costa, M. R., Tubino, R. A., Mattos, T. M., Almeida, P. R. C., Monteiro, L. F. A., de Andrade, D. H., Pinto, S. M., Tomás, A. R. G. & Monteiro-Neto, C. 2021. Diversidade de habitats e estrutura das assembleias de peixes e crustáceos. In: Costa, M. R., Monteiro-Neto, C., Tubino, R. A. & Angelini, R. (eds.) *Pesca e sustentabilidade: Passado, presente e futuro Pesca e sustentabilidade: passado, presente e futuro*. Rio de Janeiro: Alexandre Honorato Duarte Ferreira.

Cruz LR, Santos LN and Santos AFGN (2018) Changes of fish trophic guilds in Araruama Lagoon, Brazil: what can be inferred about functioning and structure of hypersaline lagoons? *Estuarine Coastal and Shelf Science* 211, 90–99.

De Rezende, C., Franco, M., Gomes, A., De Almeida, M., & Santos, A. (2020). Uso de isótopos estáveis na avaliação de guildas tróficas de peixes de uma lagoa hipersalina tropical. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 100, 979-988. <https://doi.org/10.1017/S0025315420000879>.

Domingos, P., Gômará, G. A., Sampaio, G. F., Soares, M. F. & Soares, F. F. L. 2012. Eventos de mortalidade de peixes associados a florações fitoplanctônicas na Lagoa Rodrigo De Freitas: programa de 10 anos de monitoramento. *Oecologia Australis*, 16(3): 441-466.

Dos Santos, M. C. Contribuição à gestão das lagoas costeiras: conhecimento tradicional, técnico e científico associado a um manejo dos recursos naturais da lagoa de Carapebus, Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba-RJ, 2008.

Eckrich CA, Albeke SE, Flaherty EA, Bowyer RT, Ben -David M (2019) rKIN: Kernel-based method for estimating isotopic niche and overlap. *J Anim Ecol* 89:757–771

Elliott, M., Whitfield, A. K., Potter, I. C., Blaber, S. J., Cyrus, D. P., Nordlie, F. G. & Harrison, T. D. 2007. The guild approach to categorizing estuarine fish assemblages: a global review. *Fish and fisheries*, 8(3), 241-268.

Elliot, M. & V. Quintino, 2007. The estuarine quality paradox, environmental homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin* 54: 640–645.

Esteves, F.A., Caliman, A., Santangelo, J.M., Guariento, R.D., Farjalla, V.F., Bozelli, R.L., 2008. Neotropical coastal lagoons: an appraisal of their biodiversity, functioning, threats and conservation management. *Braz. J. Biol.* 68 (4), 967–981.

Enrich-Prast, A. 2012. Lagoa Rodrigo de Freitas: futuro. *Oecologia Australis*, 16(3), 721-727.

Figueiredo, J. L. & Menezes, N. A. 1978. *Manual dos peixes marinhos do Sudeste do Brasil II. Teleostei (1)*, São Paulo, Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.

Figueiredo, J. L. & Menezes, N. A. 1980. *Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. III. Teleostei (2)*, São Paulo, Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.

Figueiredo, J. D. & Menezes, N. A. 2000. *Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. VI. Teleostei (5)*, São Paulo, Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.

Franco, A. C. S., Araújo, F. G., Santos, A. F. G. N., Tubino, M. F. A. & Santos, L. N. 2022. From meso to hyperhaline: the importance of Neotropical coastal lagoons in supporting the functional fish diversity at regional scale. *Hydrobiologia*, 849(17), 4101-4118.

Freitas, L. A. & Araújo, F. G. 2025. Assessing Fish Community Structure and Diversity Across Environmental Gradients in a Tropical Bay. *Marine Ecology*, 46(2), e70016.

Franco, A. C. S., Araújo, F. G., dos Santos, A. F. G. N., de Andrade-Tubino, M. F., & dos Santos, L. N. (2022). From meso to hyperhaline: the importance of neotropical coastal lagoons in supporting the functional fish diversity at regional scale. *Hydrobiologia*, 849(17), 4101-4118.

FRY, B. Stable Isotope Ecology. New York: Springer: p. 308. DOI:10.1007/0-387-33745-8. 2006.

Fry, B. 2008. Stable Isotope Ecology. 3rd ed. Springer-Verlag, New York, 308 pp.

Fry, B., Davis, J., 2015. Rescaling stable isotope data for standardized evaluations of food webs and species niches. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 528, 7–17. <https://doi.org/10.3354/meps11293>.

Gandhi, G., Marcelo, O. & Leite, M. M. A. 2020. Environmental monitoring of water quality as a planning and management tool: a case study of the Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro, Brazil. In: Manning, A. J. (ed.) *Lagoon Environments Around the World-A Scientific Perspective*. IntechOpen.

Henriques, S., F. Guilhaumon, S. Ville'ger, S. Amoroso, S. Franc,a, S. Pasquard, H. N. Cabral, & R. P. Vasconcelos, 2017. Biogeographical region and environmental conditions drive functional traits of estuarine fish assemblages worldwide. *Fish & Fisheries* 18: 752–771

Herman, P. M. J., J. J. Middelburg, J. Widdows, and C. H. Lucas. 2000. Stable isotopes as trophic tracers: Combining field sampling and manipulative labelling of food resources for macrobenthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 204: 79–92. doi:10. 3354/Meps204079

Hirons, A., Blana, C., Kerstetter, D., & Gumbleton, S. (2021). Isótopos estáveis e parasitas indicam ecologia alimentar na Flórida, EUA, Wading Birds. *Waterbirds*, 43, 238-250. <https://doi.org/10.1675/063.043.0302>.

Hoffman JC, Sutton TT (2010) Lipid correction for carbon stable isotope analysis of deepsea fishes. *Deep-Sea Res I* 57:956–964

ICES Journal of Marine Science (2014), Environmental factors influencing d13C and d15N in three Chesapeake Bay fishes. 71(3), 689–702. doi:10.1093/icesjms/fst143

- Jackson, A. L., Inger R., Parnell, A. C., Bearhop S. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER – Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*. 80, 595-602.
- Kjerfve, B., 1994. Coastal lagoons. In: Kjerfve, B. (Ed.), *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Oceanography Series 60, Elsevier, Amsterdam, pp. 1–8.
- Knoppers, B.; Kjerfve, B. Coastal lagoons of southeastern Brazil: physical and biogeochemical characteristics. In: *Estuaries of South America*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 35-66. 1999.
- Krumsick, K.J., Fisher, J.A.D., 2019. Spatial and ontogenetic variation in isotopic niche among recovering fish communities revealed by Bayesian modeling. *PloS One* 14 (4), e0215747. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215747>.
- Kucklick, J., Frazier, B., Shaw, A., & Sancho, G. (2016). Ecologia Trófica de uma Comunidade Predatória em um Estuário de Águas Rasas e Alta Salinidade, avaliada por Análise de Isótopos Estáveis. *Pescas Marinhas e Costeiras: Dinâmica, Gestão e Ciência de Ecossistemas*, 8, 46-61. <https://doi.org/10.1080/19425120.2015.1121940>.
- Layman, Craig A. et al. As razões isotópicas estáveis podem fornecer medidas de estrutura trófica em toda a comunidade? *Ecologia*, v. 88, n. 1, pág. 42-48, 2007.
- Layman, Craig A. et al. Aplicando isótopos estáveis para examinar a estrutura da teia alimentar: uma visão geral das ferramentas analíticas. *Revisões biológicas*, v. 87, n. 3, pág. 545-562, 2012. DOI:10.1890/0012-9658(2007)88
- Layman, C. A., Quattrochi, J. P., Peyer, C. M., & Allgeier, J. E. 2007b. Niche width collapse in a resilient top predator following ecosystem fragmentation. *Ecology Letters*, 10, 937–944.
- Loureiro, D. D., Fernandez, M. A., Herms, F. W. & Lacerda, L. D. 2009. Heavy metal inputs evolution to an urban hypertrophic coastal lagoon, Rodrigo De Freitas Lagoon, Rio De Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159, 577-588.
- Loureiro, D., Fernandez, M., Herms, F., Araújo, C. & Lacerda, L. D. D. 2012. Distribuição dos metais pesados em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis*, 16(3), 353-364.
- Logan JM, Jardine TD, Miller TJ, Bunn SE, Cunjak RA, Lutcavage ME (2008) Lipid correction s in carbon and nitrogen stable isotope analyses: comparison of chemical and modelling methods. *J Anim Ecol* 77:838–846
- Machado, L. B. 2009. *Evolução da degradação ambiental da Bacia Hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas - RJ. Dissertation*. Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Available at: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=159214. Accessed 21 Jan 2025.
- Marsella, E., Barra, M., Gherardi, S., Sprovieri, M., & Rumolo, P. (2011). Isótopos estáveis e relações C/N em sedimentos marinhos como ferramenta para discriminar o impacto antropogênico. *Journal of environmental monitoring: JEM*, 13 12, 3399-408. <https://doi.org/10.1039/c1em10568j>.
- Menezes, N. A. & Figueiredo, J. L. 1980. *Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil. III. Teleostei (2)*, São Paulo, Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.
- Menezes, N. A. & Figueiredo, J. L. 1985. *Manual de peixes marinhos do sudeste do Brasil V Teleostei (4)*, São Paulo, Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.

- McMahon, KW, Hamady, LL, & Thorrold, SR (2013). Uma revisão de abordagens ecogeoquímicas para estimar movimentos de animais marinhos. *Limnologia e oceanografia*, 58 (2), 697-714.
- Moraes, L. A. F. & Andreata, J. V. 1994. Relações tróficas entre as cinco espécies de peixes mais representativas nas margens da Laguna de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Zoologia*, 11(4), 789-800.
- Moraes, L. A. F., Andreata, J. V. & de Oliveira, B. T. 2014. Diversity and fish distribution at Rodrigo de Freitas Lagoon, Rio de Janeiro State, Brazil, using GIS. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 36(1), 7-18.
- Moreno-Pérez, I., Barjau-González, E., Arreola-Lizárraga, J., Padilla-Serrato, J., Rodríguez-Romero, J., & Martínez, J. (2024). Comunidade de peixes, movimento sazonal e uso de habitat em uma lagoa costeira subtropical. *Revista Latino-Americana de Pesquisa Aquática*. <https://doi.org/10.3856/vol52-issue1-fulltext-3108>.
- Neres-Lima, V., Machado-Silva, F., Baptista, D. F., Oliveira, R. B. S., Andrade, P. M., Oliveira, A. F., Sasada-Sato, C. Y., Silva-Junior, E. F., Feijo-Lima, R., Angelini, R., Camargo, P. B., & Moulton, T. P. 2017. Allochthonous and autochthonous carbon flows in food webs of tropical forest streams. *Freshwater Biology*, 62(6), 1–12. DOI:10.1111/fwb.12921
- Patterson, H. K., & Carmichael, R. H. (2018). Dissolved oxygen concentration affects $\delta^{15}\text{N}$ values in oyster tissues: implications for stable isotope ecology. *Ecosphere*, 9(3), e02154.
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I. M. & Pérez-Marcos, M. 2013. Are coastal lagoons physically or biologically controlled ecosystems? Revisiting r vs. K strategies in coastal lagoons and estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 132, 17-33.
- Pérez-Ruzafa, A., Pérez-Ruzafa, I. M., Newton, A. & Marcos, C. 2019. Chapter 15 - coastal lagoons: environmental variability, ecosystem complexity, and goods and services uniformity. In: Wolanski, E., Day, J. W., Elliott, M. & Ramesh, R. (eds.) *Coasts and Estuaries*. New York: Elsevier.
- Pereira, R. C. & Andreata, J. V. 2003. Aspectos reprodutivos de *Phalloptychus januarius* (Hensel, 1868) (Cyprinodontiformes, Poeciliidae) da Laguna Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Zoociências*, 5(1), 79-87.
- Peterson BJ, Fry B (1987) Stable isotopes in ecosystem studies. *Annu Rev Ecol Syst* 18:293– 320.
- Post, D. M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, Methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3): 703 – 718.
- Post, D. M., Layman, C. A., Arrington, D. A., Takimoto, G., Quattrochi, J., & Montana, C. G. (2007). Getting to the fat of the matter: models, methods and assumptions for dealing with lipids in stable isotope analyses. *Oecologia*, 152, 179-189.
- R CORE TEAM (R Foundation for Statistical Computing) 2020. *R: A language and environment for statistical computing*. Available at: <https://www.R-project.org/>. Accessed 23 Apr 2025.
- Raesly, R., Hitt, N., & Landsman, A. (2022). Estratégias de história de vida de peixes de riachos ligadas a preditores de estabilidade hidrológica. *Ecologia e Evolução*, 12. <https://doi.org/10.1002/ece3.8861> .
- Reis, A. S., Albrecht, M. P., & Bunn, S. E. 2020. Food web pathways for fish communities in small tropical streams. *Freshwater Biology*, 65(5), 893–907. DOI:10.1111/fwb.13471
- RICKLEFS, Robert. A economia da natureza. 5ed. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 2003.

- RIOÁGUAS (Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro). 2013. Atualização do plano de gestão ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas (PGALRF). Available at: <http://www.rio.rj.gov.br/documents/91265/2972533/10+-+RIOAGUAS+-+Plano+de+Gest%C3%A3o+Ambiental+da+Lagoa+Rodrigo+de+Freitas+-2013>. Accessed 15 Mai 2025.
- Rodrigues, A. E. M. 2012. Lagoa: história de uma ocupação desordenada. *Oecologia Australis*, 16(3), 339-352.
- Rodrigues, A. J. D. S., Fernandes, M. R., Miyahira, I. C., Santos, L. N. & Caetano, C. H. S. 2021. Benthic macrofauna associated to the invasive bivalve *Mytilopsis leucophaeata* (Dreissenidae) in a coastal lagoon in Rio de Janeiro, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93, e20191221.
- Rodrigues-Filho, J. L., Macêdo, R. L., Sarmento, H., Pimenta, V. R., Alonso, C., Teixeira, C. R., ... & Cionek, V. M. (2023). From ecological functions to ecosystem services: linking coastal lagoons biodiversity with human well-being. *Hydrobiologia*, 850(12), 2611-2653.
- Rossi, S., Zayas, R., Hernández-Fernández, L., Merino-Ibarra, M., Velázquez-Ochoa, R., Soares, M., Soto-Jiménez, M., & Castillo-Sandoval, F. (2020). Isótopos estáveis usados para avaliar os impactos da poluição nos ecossistemas costeiros e marinhos de Cuba e do México. *Estudos Regionais em Ciências Marinhas*, 39, 101413. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101413>.
- Santoro, Ana Lúcia; RICCI, Renata Maria Pereira; ENRICH-PRAST, Alex. Lagoa rodrigo de freitas: passado e presente. *Oecologia Australis*, v. 16, n. 3, p. 334-338, 2012.
- Shipley, O. N., & Matich, P. 2020. Studying animal niches using bulk stable isotope ratios: na updated synthesis. *Oecologia*, 193(1), 27–51. DOI:10.1007/s00442-020-04654-4
- Soares, M. F., Domingos, P. & Telles, L. F. R. 2012. 10 anos de monitoramento da qualidade ambiental das águas da lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis*, 16(3), 581-614.
- Soberón, J., Arroyo-Peña, B. 2017. Are fundamental niches larger than the realized? Testing a 50-year-old prediction by Hutchinson. *PloS ONE*.
- Stephens, R. B., O. N. Shipley, and R. J. Moll. 2023. Metaanalysis and critical review of trophic discrimination factors ($\Delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{15}\text{N}$): Importance of tissue, trophic level and diet source. *Funct. Ecol.* 37: 2535–2548. doi:10.1111/1365- 2435.14403
- Vezone, M., Cesar, R., Polivanov, H., Serrano, A., Siqueira, D., Abreu, L., Bianchi, M., Correia, M. E., Castilhos, Z. & Campos, T. 2018. Ecotoxicological evaluation of dredged sediments from Rodrigo de Freitas Lagoon (Rio de Janeiro State, Brazil) using bioassays with earthworms and collembolans. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-12.
- Winemiller, K. O. 2005. Life history strategies, population regulation, and implications for fisheries management. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62(4), 872-885.
- Zandona, E., Dalton, C. M., El-Sabaawi, R. W., Howard, J. L., Marshall, M. C., Kilham, S. S., Reznick, D. N., Travis, J., Kohler, T. J., Flecker, A. S., Thomas, S. A., & Pringle, C. M. 2017. Population variation in the trophic niche of the Trinidadian guppy from different predation regimes. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. DOI:10.1038/s41598-017-06163-6