



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**  
**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**INDICADORES BIOLÓGICOS OU AMBIENTAIS, QUAL REFLETE MELHOR A  
QUALIDADE DE ESTUÁRIOS TROPICAIS?**

**MILENA MARIA DE LUNA FRANCISCO**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2019**

**MILENA MARIA DE LUNA FRANCISCO**

**INDICADORES BIOLÓGICOS OU AMBIENTAIS, QUAL REFLETE MELHOR A  
QUALIDADE DE ESTUÁRIOS TROPICAIS?**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental  
da Universidade Estadual da Paraíba, em  
cumprimento as exigências para obtenção do  
título de mestre.

**ORIENTADOR (A): Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. JOSELINE MOLOZZI**

**CAMPINA GRANDE-PB**

**2019**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F819i Francisco, Milena Maria de Luna.  
Indicadores biológicos ou ambientais, qual reflete melhor a qualidade de estuários tropicais? [manuscrito] / Milena Maria de Luna Francisco. - 2019.  
56 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.  
"Orientação : Profa. Dra. Joseline Molozzi, Departamento de Biologia - CCBS."  
1. Macroinvertebrados bentônicos. 2. Índice TRIX. 3. Índice de Shannon-Wiener. 4. Índice de eco-exergia. I. Título  
21. ed. CDD 628

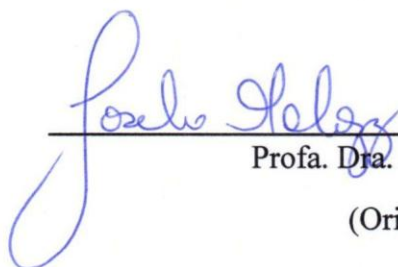
MILENA MARIA DE LUNA FRANCISCO

INDICADORES BIOLÓGICOS OU AMBIENTAIS, QUAL REFLETE MELHOR A  
QUALIDADE DE ESTUÁRIOS TROPICAIS?

Dissertação apresentada ao Programa de Pós  
Graduação em Ciência e Tecnologia  
Ambiental da Universidade Estadual da  
Paraíba, em cumprimento as exigências para  
obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 21 / 02 / 2019

**Comissão examinadora:**



---

Prof. Dra. Joseline Molozzi

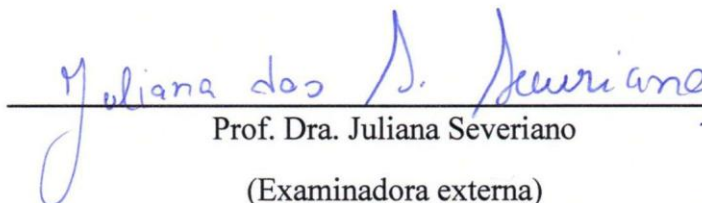
(Orientadora)



---

Prof. Dra. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

(Examinadora interna)



---

Prof. Dra. Juliana Severiano

(Examinadora externa)

Aos meus pais Vera Luna e José Francisco e a minha irmã Heloíza Luna, meu alicerce.

Dedico

## AGRADECIMENTOS

Como não lembrar ao primeiro instante daquele que meu deus a oportunidade de estar onde estou, me fortaleceu para conseguir prosseguir e me acolheu seu colo quando bateu o desespero e pensei que não daria certo? A Deus, agradeço por sua imensa bondade, amor e misericórdia. Como não agradecer também aquela que com seu amor materno tanto me acalmou com seu regaço acolhedor, que com o seu exemplo de silêncio me ajudou nos combates cotidianos, obrigada Nossa Senhora por me cobrir na paz de seu olhar e ao meu anjo da guarda que sem dúvida também muito me guiou.

Aos meus pais Vera Luna e José Francisco, por todo apoio, carinho e amor, sem vocês meus dias teriam sido mais difíceis, obrigada pelas palavras, força, paciência e por vibrar comigo em cada conquista.

A minha irmã Ana Heloiza, por todo o apoio, auxílio e por mesmo sem querer ouvir minhas prévias kkkkk fazia isso com paciência e ainda elaborava questionamentos além de me fazer rir mesmo quando a situação não era favorável.

Ao meu noivo Erlan, por também me auxiliar dentro de suas possibilidades, por toda paciência principalmente em meio às ausências e por toda a força para prosseguir.

A minha querida orientadora Joseline Molozzi, por me acolher tão bem quando cheguei de “para-quedas” no laboratório, por todo o incentivo, carinho, cuidado, reclamações quando necessárias, por toda exigência, paciência e compreensão. És um exemplo de profissional para mim e sou muito feliz por ter tido a honra de lhe conhecer e tê-la como orientadora.

A minha querida coorientadora Izabelly Gomes, por seu imenso auxílio, cuidado, amizade e por sua enorme paciência, tudo que trabalhei no mestrado era completamente novo para mim desde a teoria até a prática e você honrou muito bem a missão que lhe foi confiada de me ensinar tudo desde o princípio, seu apoio foi fundamental para mim, muito obrigada!

A minha banca composta pelas professoras Beatriz Ceballos e Juliana Severiano por toda disponibilidade, dedicação, atenção e cuidado, vocês contribuíram de modo enriquecedor com a melhoria deste.

A todos que fazem parte do Laboratório de Ecologia de Bentos (LEB-UEPB) por todo apoio, auxílio, amizade, pelos momentos de tensão, mas também de descontração. Aprendi

muito com vocês, essa conquista não é só minha, mas de toda nossa equipe, vocês foram fundamentais. Agradeço em especial as minhas companheiras de muitas tardes: Izabelly, Carlinda, Francielly e Daleska por toda a ajuda e por tornar os dias mais alegres mesmo em meio as preocupações. Agradeço a Carlinda por sua imensa ajuda principalmente na identificação dos Polychaetas. A Climélia (prima que descobri durante o mestrado) e Monalisa por toda ajuda com as planilhas, triagem, estatística e exergia. A Érica por sua grande boa vontade em sempre ajudar o próximo, muito ter me auxiliado com nossas discussões sobre a exergia e pela ajuda com o programa R. A Mayara por sua ajuda com a biomassa e principalmente por sua tão abençoada amizade fortalecida na fé. A Marcos pelo auxílio na edição dos mapas. A Regina pelo companheirismo e amizade. Muito obrigada LEB!

A Daniely e Juliana pela disponibilidade e auxílio na construção dos gráficos.

A minha maravilhosa turma do PPGCTA, por toda amizade, sintonia, companheirismo e auxílio principalmente com as disciplinas, por vibrarem juntos com a conquista de cada um e estenderem a mão sempre que necessário. Agradeço em especial aos meus amigos Eliane, Edson, Ana Alice, Jéssica, Larissa, Vanessa e Ranally pela convivência, carinho e atenção.

A CAPES, por todo apoio com o financiamento dessa pesquisa.

*“Nada te perturbe, nada te espante, quem a Deus tem, nada lhe falta, só Deus basta!”*

Santa Tereza D’Ávila



## RESUMO GERAL

Devido a capacidade de refletir alterações no ecossistema aquático, as comunidades de macroinvertebrados bentônicos tem sido utilizada em ampla escala em pesquisas no mundo todo. Este trabalho teve por objetivo avaliar qual dos indicadores: biológicos por meio do índice de diversidade de Shannon-Wiener e índices termodinâmicos como a eco-exergia e eco-exergia específica ou ambientais por meio do índice de estado trófico TRIX, são capazes de refletir melhor a qualidade da água de estuários da região tropical. A hipótese testada é de que os aspectos biológicos são os que melhor refletem o estado da qualidade da água pois são formados por um grupo bastante diversificado, com diferentes níveis de tolerância e a informação genética incorporada em sua biomassa, capazes de refletir alterações no ambiente em escala temporal quanto espacial. O estudo foi desenvolvido em dois estuários tropicais localizados no estado da Paraíba, Brasil, o estuário do Rio Mamanguape e o estuário do Rio Paraíba do Norte, ambos com diferentes usos e ocupações do solo. Os estuários foram divididos em 4 zonas com três pontos, cada um destes contendo três réplicas amostrais. Para avaliar se houve diferenças significativas entre as zonas, períodos e estuários para os determinados indicadores foi realizada uma PERMANOVA. A eco-exergia mostrou resposta diferente do esperado, apresentando valores mais elevados em ambientes mais impactados, contudo ao avaliar a comunidade de macrobentônicos foi possível perceber que esse aumento de eco-exergia deve-se a presença em elevada quantidade do molusco exótico *Bracdonates*, aumentando a biomassa e consequentemente o índice, mostrando assim a importância do estudo da composição da comunidade. A eco-exergia específica refletiu de acordo com o esperado, apresentando valores inferiores em locais mais perturbados. Os locais onde obtiveram maiores valores para o Shannon foi observado a presença de espécies tolerantes em sua maioria, justificando assim os valores elevados do índice em locais de impacto. O TRIX foi maior no estuário do rio Paraíba, isso deve-se pelo maior impacto devido as atividades antrópicas sofridas neste, contudo, não diferenciou como esperado do estuário do rio Mamanguape considerando que este sofre menor atividade antrópica. Sendo assim foi concluído que os indicadores biológicos em conjunto refletem melhor a qualidade ambiental e que o indicador ambiental pode ser utilizado de forma complementar e não de forma única.

**Palavras chaves:** macroinvertebrados bentônicos, TRIX, eco-exergia e eco-exergia específica, Shannon-Wiener

## ABSTRACT

Due to the ability to reflect changes in the aquatic ecosystem, benthic macroinvertebrate communities have been used on a wide scale in surveys worldwide. The objective of this work was to evaluate which of the following indicators: biological through the Shannon-Wiener diversity index and thermodynamic indexes such as ecoregeneration and specific eco-exergy or environmental ones through the TRIX trophic index index, are able to reflect better the water quality of estuaries in the tropical region. The hypothesis tested is that the biological aspects are the ones that best reflect the state of the water quality because they are formed by a very diversified group, with different levels of tolerance and the genetic information incorporated in their biomass, able to reflect changes in the environment in temporal and spatial scale. The study was carried out in two tropical estuaries located in the state of Paraíba, Brazil, the Mamanguape River estuary and the Paraíba do Norte River estuary, both with different uses and occupations of the soil. The estuaries were divided into 4 zones with three points, each containing three sample replicates. To evaluate if there were significant differences between the zones, periods and estuaries for the determined indicators, a PERMANOVA was performed. However, when evaluating the community of macrobenthic, it was possible to perceive that this increase of eco-exergy is due to the presence in high amount of the exotic mollusk *Bracdonates*, increasing biomass and consequently the index, thus showing the importance of the study of community composition. The specific eco-exergy reflected as expected, presenting lower values in more disturbed places. The places where the highest values were obtained for the Shannon were observed the presence of tolerant species in the majority, thus justifying the high values of the index in places of impact. The TRIX was higher in the estuary of the Paraíba River, due to the greater impact due to the anthropic activities suffered in this, however, did not differentiate as expected from the Mamanguape River estuary considering that it has lower anthropic activity. Thus, it was concluded that the biological indicators together reflect better the environmental quality and that the environmental indicator can be used in a complementary way and not in a unique way.

**Keywords:** benthic macroinvertebrates, TRIX, eco-exergy and specific eco-exergy, Shannon-Wiener

## LISTA DE FIGURAS

**FIGURA 1-** Localização geográfica dos estuários do Paraíba do Norte e Mamanguape, Paraíba, Brasil e pontos amostrais .....24

**FIGURA 2 –** Figura 2. Boxplot com indicadores físicos e químicos utilizados para o TRIX referente as zonas I, II, III, e IV do estuário do Rio Mamanguape no período de seca (cor clara) e chuva (cor escura) respectivamente. Letras menores indicando se ocorreu ou não diferenças significativas entre as zonas. Os boxplot que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.....31

**FIGURA 3 –** Figura 2. Boxplot com indicadores físicos e químicos utilizados para o TRIX referente as zonas I, II, III, e IV do estuário do Rio Paraíba no período de seca (cor clara) e chuva (cor escura) respectivamente. Letras menores indicando se ocorreu ou não diferenças significativas entre as zonas. Os boxplot que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.....31

**FIGURA 4:** Estuário do Paraíba. Letras indicando o índice de Shannon (S), Eco-exergia (E), Eco-exergia específica (ES) e TRIX (T), no período da chuva indicado pela letra A e seca indicado pela letra B respectivamente.....32

**FIGURA 5:** Estuário do Mamanguape. Letras indicando o índice de Shannon (S), Eco-exergia (E), Eco-exergia específica (ES) e TRIX (T), no período da chuva indicado pela letra A e seca indicado pela letra B respectivamente.....33

## LISTA DE TABELAS

**TABELA 1-** Composição da comunidade bentônica nos estuários dos Rios Paraíba e Mamanguape nos períodos de seca e chuva. Valores demonstrando abundância por taxas.....48

**TABELA 2-** Valores da Eco-exergia e Eco-exergia específica, riqueza e índice de Shannon-Weiner nos estuários dos Rios Paraíba e Mamanguape nos períodos de seca e chuva dispostos por zona .....54

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivo específicos.....	17
<b>3. PERGUNTA E HIPÓTESE.....</b>	<b>18</b>
<b>MANUSCRITO.....</b>	<b>19</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>20</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>21</b>
<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2.MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
2.1 Área de estudo.....	24
2.2 Desenho amostral e período da coleta.....	25
2.3 Macroinvertebrados bentônicos.....	25
2.4 Análise física e química da água.....	26
2.5 Biomassa.....	26
2.6 Indicador biológico.....	26
2.6.1 Índice de Shannon-Wiener.....	26
2.6.2 Índice de eco-exergia e eco-exergia específica.....	26
2.7 Indicadores ambientais.....	27
2.7.1 Índice TRIX.....	27
2.8 Análise de dados.....	28
<b>3.RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
3.1 Indicadores biológicos.....	29
3.1.1 Índices de Shannon e riqueza.....	29
3.1.2 Índices de eco-exergia e eco-exergia específica.....	29
3.2 Indicadores físicos e químicos.....	29
3.2.1 Índice TRIX.....	30
3.3 Comunidade de macroinvertebrados bentônicos.....	30
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
4.1 Indicadores biológicos.....	34

4.1.1 Índices de Shannon e riqueza.....	35
4.1.2 índices de eco-exergia e eco-exergia específica.....	35
4.2 Indicadores físicos e químicos .....	36
4.2.1 Índice TRIX.....	36
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>47</b>

## 1.INTRODUÇÃO GERAL

Estuários são ecossistemas aquáticos costeiros, de transição entre o rio e o mar e por isso são considerados um dos ambientes mais dinâmicos e estão entre os ecossistemas mais produtivos do mundo (LEVINTON, 2013). Tais ambientes possuem características complexas quanto aos processos de circulação das massas d'água, com retenção ou exportação de materiais dissolvidos e particulados para a zona costeira adjacente (MIRANDA, 2012). Constituem um valioso ecossistema em termos econômicos, culturais e científicos, por isso, a preservação desses ambientes é de vital importância, pois, além de servirem como área de alimentação, berçário, habitat, refúgio e reprodução de várias espécies, são fonte de renda para muitas famílias (SANTOS, 2002; BASTOS, FEITOSA E MUNIZ, 2005).

Nesses ecossistemas, os impactos são causados principalmente por uso desordenado do solo e crescimento não planejado dos grandes centros urbanos, desmatamento de vegetação nativa, impermeabilização dos solos, retirada da mata ripária, carcinocultura, criação de caranguejo e liberação de esgoto urbano (MACEDO, CALLISTO, MAGALHÃES, 2011; WETZEL et al, 2012), promovendo a perda de bens e serviços ecossistêmicos (MACEDO, CALLISTO, MAGALHÃES, 2011). Estas atividades prevalecem em escalas locais com repercussão global (HUGHES, FERREIRA, CORTEZ, 2008).

Os impactos ambientais gerados pelo lançamento dos esgotos domésticos e industriais são, por exemplo, a contaminação microbiológica, a alteração da biodiversidade, o acréscimo de matéria orgânica no meio marinho e o enriquecimento por nutrientes, podendo causar eutrofização e a deposição de resíduos sólidos nos sedimentos marinhos (MARTINS et al, 2008). Isso justifica a necessidade de estudos em regiões estuarinas, para colaborar com informações que possam auxiliar na implementação de futuros programas de monitoramento desses ecossistemas.

Como forma de avaliar a qualidade ambiental dos estuários e compreender como as atividades antrópicas estão afetando o ambiente é realizado biomonitoramento. Este, com a ajuda de organismos bioindicadores pode ser considerado uma ferramenta sensível para a avaliação dos impactos no ecossistema (PRABHAKRAN et al, 2017). O biomonitoramento é um dos meios mais importantes para avaliar e quantificar os processos das interações água e biota bem como das interações humanas (PRABHAKRAN et al, 2017). Para o seu bom

desenvolvimento e eficácia, é importante a utilização de indicadores biológicos confiáveis. Para isso, é necessário que os mesmos sejam capazes de separar os efeitos da variabilidade natural da perturbação antrópica (HUGHES, FERREIRA, CORTEZ, 2008; CHEN et al, 2014).

Entre os vários organismos presentes nos estuários, podem-se destacar os macroinvertebrados bentônicos, que por meio das características da comunidade, permitem determinar a qualidade ecológica desses sistemas. Essas comunidades têm sido amplamente utilizadas como uma ferramenta eficaz para a avaliação ambiental dos sistemas litorâneos (CARVALHO et al, 2010; WILDSMITH et al, 2011; TWEEDLEY et al, 2012; VERÍSSIMO et al, 2012; WU et al, 2019).

Os macroinvertebrados bentônicos constituem um dos grupos mais diversificados e abundantes dos ambientes aquáticos (ZARDO et al, 2013). Possuem baixa mobilidade e vivem em estreita associação com o substrato, apresentando espécies com diferentes ciclos de vida e diferentes níveis de tolerância à contaminações ou outras situações de stress, o que permite usá-los com indicadores ambientais (SOUSA, 2016).

Alterações ambientais podem provocar mudanças na distribuição e composição da comunidade, pois os organismos são sensíveis a múltiplos fatores como tipos de sedimentos e impactos antropogênicos, os quais afetam a disponibilidade de recursos para a comunidade bentônica (MUNIZ & PIRES, 1999; BAE et al, 2013), refletindo o grau de impacto das perturbações (BILYARD, 1987). Sendo assim, utilizadas em pesquisas em vários países (YI et al, 2018; LINHARES, CALLISTO, MARQUES, 2018; SHI et al, 2018).

Para avaliar a qualidade ambiental dos ecossistemas, são necessárias metodologias que reflitam os diferentes graus de contaminação a que os ecossistemas estão submetidos (SALAS et al, 2005), para isso, pode ser utilizados indicadores biológicos e ambientais, que por meio de seus índices auxiliam na melhor avaliação da qualidade ambiental (PENG et al, 2014).

Entre os indicadores biológicos estão os baseados na riqueza e abundância da comunidade como o índice de diversidade de Shannon-Wiener (SHANNON E WEAVER, 1963). Este índice é um dos mais utilizados para medir a diversidade (SHANNON E WIEVER, 1949; RIOS E MAZZONI, 2014) além de ser independente do tamanho das amostras (MELO, 2008), sendo assim, consideram proporções e não números absolutos (GAMITTO, 2010). Este



índice foi utilizado em pesquisas para estudo do estado ecológico e analisado as mudanças na comunidade avaliada (MAGURRAN, 2004; YAN et al, 2017).

Outro indicador biológico utilizado para avaliar a qualidade ambiental de ecossistemas são os indicadores termodinâmicos, tais como eco-exergia, eco-exergia estrutural ou eco-exergia específica, propostos por diferentes pesquisadores (ODUM, 1988; JORGENSEN, 1995; PATTEN et al, 2002; ULANOWICZ, 1986).

A eco-exergia é uma ferramenta utilizada para indicar o desempenho e organização do sistema ecológico. Por ser considerada uma boa ferramenta, a eco-exergia tem sido utilizada em várias formas principalmente como indicador ecológico de ecossistemas (JORGENSEN, 2007; ZHANG, GURKAN, JORGENSEN, 2010; MANDAL, RAY, JORGENSEN, 2012; MOLOZZI et al, 2013), para descrever as consequências da mudança global (HERMANN, 2006), na modelagem de ecossistemas (ZHANG, 2004). Esta é uma abordagem inovadora que possibilita avaliar os mesmos por meio de parâmetros biofísicos (TUNDISI et al, 2012) e considera a energia livre de entropia, ou seja, que não pode mais ser transformada em trabalho.

A eco-exergia apresenta algumas vantagens, entre elas: possui um cálculo é relativamente fácil (PATTEN et al, 2002), além de calcular a capacidade de trabalho que os organismos possuem por meio da biomassa e informação incorporada no seu genoma expressa por meio de  $\beta$  valores (JORGENSEN et al, 2010). Esses  $\beta$  valores, leva em consideração as relações taxonômicas dos grupos de organismos, desse modo, os indivíduos que apresentam proximidade entre os grupos de espécies ou famílias possuem o mesmo  $\beta$  valor.

Juntamente com a eco-exergia deve ser analisada a eco-exergia específica (JORGENSEN, 2006). Esta é definida como a eco-exergia dividida pelo valor total da biomassa do ecossistema, aumentando muitas vezes com o desenvolvimento da rede ecológica e sempre com o aumento de informações (JORGENSEN, 2008) de modo que a mesma, juntamente com a eco-exergia podem ser utilizada diretamente como um indicador da qualidade ambiental (JORGENSEN E NIELSEN, 2007).

É esperado pela eco-exergia que quanto maior o valor da biomassa de um ecossistema e consequentemente quanto mais informações ele contém, mais elevado é a eco-exergia, contudo a eco-exergia específica torna-se independente da biomassa, ou seja, não depende da quantidade de matéria (JORGENSEN, 2008, VASSALO et al, 2012). Por isso se explica por que é recomendado o uso de ambos os indicadores de avaliação da qualidade do ecossistema.

A análise por indicadores termodinâmicos, tem sido utilizada em estuários da região temperada. Em trabalhos realizados na Rússia, é observado que os valores de eco-exergia são mais elevados onde a água é de boa qualidade, e a eco-exergia específica são menores nos locais mais impactados que em ambientes mais íntegros (MARQUES et al, 2003; SILOW E MOKRY, 2010). Estes estudos estão de acordo com a teoria da termodinâmica, onde a variação da energia interna entre dois sistemas pode ser determinada pela diferença entre a quantidade de calor e o trabalho trocado com o meio ambiente (JORGENSEN E NIELSEN, 2007; ZHANG, GURKAN, JORGENSEN, 2010).

Entre os indicadores ambientais estão os baseados no estado de eutrofização do ecossistema. A eutrofização é definida como o processo de enriquecimento por nutrientes e matéria orgânica em corpos aquáticos e o aumento da produção primária (NIXON, 1995). Este é ocasionado pelo lançamento excessivo de nutrientes nos ambientes aquáticos, provocando mudanças nas características dos corpos d'água. Este fenômeno é denominado eutrofização antrópica ou eutrofização cultural (LAMPARELLI, 2004). A eutrofização pode levar à alteração no odor, sabor, turbidez, cor da água e à redução do oxigênio dissolvido alterando a dinâmica ambiental (MOTA, 2006; BOYER et al, 2009). A análise do grau de eutrofização de um corpo aquático pode ser avaliada através de classificações tróficas que se expressam em Índices do Estado Trófico (IET) (TAVARES et al, 2014).

O índice de estado trófico calculado por meio do método TRIX (Trophic Index) proposto por Vollenweider et al em 1998, traz como diferencial uma abordagem multiparamétrica e também o fato de ser desenvolvido e aprimorado para estuários, por meio de sua aplicação em programas internacionais de modelagem da eutrofização em ambientes com interface terra-mar (COTOVICZ, 2012). Este método usa como base os valores de clorofila *a* saturação de oxigênio dissolvido, nitrito, nitrato, fósforo total e amônia (VOLLENWEIDER, 1968). Devido sua capacidade de sintetizar informações ambientais, este índice foi incorporado a legislação Italiana afim de facilitar a tomada de decisões no cenário político (SANTOS, 2015).

Com o objetivo de avaliar qual indicador (biológico ou ambiental), melhor reflete a qualidade do ecossistema estuarino, o presente estudo visa que seus resultados auxiliem na implementação de futuros programas de biomonitoramento em estuários tropicais, com o intuito de propor medidas de mitigação de impactos antrópicos.

## **2.OBJETIVOS**

### *2.1 Objetivo geral*

Avaliar quais indicadores (biológicos ou ambientais) oferecem melhor resposta ao refletirem a qualidade ambiental de estuários tropicais.

### *2.2 Objetivos específicos*

- Determinar a abundância, riqueza, índices de diversidade, eco-exergia e eco-exergia específica da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em escala espacial e temporal em estuários tropicais;
- Avaliar as repostas apresentadas pelos diferentes indicadores mediante a qualidade ambiental dos estuários em estudo.

### **3.PERGUNTA E HIPÓTESE**

#### *Pergunta*

Indicadores biológicos ou ambiental: qual desses é capaz de refletir melhor a qualidade ambiental de ecossistemas estuarinos?

#### *Hipótese*

Os indicadores biológicos são os que melhor refletem a qualidade da água dos estuários pois são formados por um grupo bastante diversificado, com diferentes níveis de tolerância e a informação genética incorporada em sua biomassa, sendo capazes de refletir alterações no ambiente o que os tornam mais sensíveis as alterações antrópicas do meio em estuários tropicais.

## INDICADORES BIOLÓGICOS OU AMBIENTAIS, QUAL REFLETE MELHOR A QUALIDADE DE ESTUÁRIOS TROPICAIS?

Francisco, M.M.L; Molozzi, J.



Universidade Estadual da Paraíba – Laboratório de Ecologia de Bentos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Avenida das Baraúnas, 351, CEP 58429-500, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail:

[milenamluna@gmail.com](mailto:milenamluna@gmail.com), [jmolozzi@gmail.com](mailto:jmolozzi@gmail.com)

## RESUMO

Devido a capacidade de refletir alterações no ecossistema aquático, as comunidades de macroinvertebrados bentônicos tem sido utilizada em ampla escala em pesquisas no mundo todo. Este trabalho teve por objetivo avaliar qual dos indicadores: biológicos por meio do índice de diversidade de Shannon-Wiener e índices termodinâmicos como a eco-exergia e eco-exergia específica ou ambientais por meio do índice de estado trófico TRIX, são capazes de refletir melhor a qualidade da água de estuários da região tropical. A hipótese testada é de que os aspectos biológicos são os que melhor refletem o estado da qualidade da água pois são formados por um grupo bastante diversificado, com diferentes níveis de tolerância e a informação genética incorporada em sua biomassa, capazes de refletir alterações no ambiente em escala temporal quanto espacial. O estudo foi desenvolvido em dois estuários tropicais localizados no estado da Paraíba, Brasil, o estuário do Rio Mamanguape e o estuário do Rio Paraíba do Norte, ambos com diferentes usos e ocupações do solo. Os estuários foram divididos em 4 zonas com três pontos, cada um destes contendo três réplicas amostrais. Para avaliar se houve diferenças significativas entre as zonas, períodos e estuários para os determinados indicadores foi realizada uma PERMANOVA. A eco-exergia mostrou resposta diferente do esperado, apresentando valores mais elevados em ambientes mais impactados, contudo ao avaliar a comunidade de macrobentônicos foi possível perceber que esse aumento de eco-exergia deve-se a presença em elevada quantidade do molusco exótico *Bracdonates*, aumentando a biomassa e conseqüentemente o índice, mostrando assim a importância do estudo da composição da comunidade. A eco-exergia específica refletiu de acordo com o esperado, apresentando valores inferiores em locais mais perturbados. Os locais onde obtiveram maiores valores para o Shannon foi observado a presença de espécies tolerantes em sua maioria, justificando assim os valores elevados do índice em locais de impacto. O TRIX foi maior no estuário do rio Paraíba, isso deve-se pelo maior impacto devido as atividades antrópicas sofridas neste, contudo, não diferenciou como esperado do estuário do rio Mamanguape considerando que este sofre menor atividade antrópica. Sendo assim foi concluído que os indicadores biológicos em conjunto refletem melhor a qualidade ambiental e que o indicador ambiental pode ser utilizado de forma complementar e não de forma única.

**Palavras chaves:** macroinvertebrados bentônicos, TRIX, eco-exergia e eco-exergia específica, Shannon-Wiener

## ABSTRACT

Due to the ability to reflect changes in the aquatic ecosystem, benthic macroinvertebrate communities have been used on a wide scale in surveys worldwide. The objective of this work was to evaluate which of the following indicators: biological through the Shannon-Wiener diversity index and thermodynamic indexes such as ecoregeneration and specific eco-exergy or environmental ones through the TRIX trophic index index, are able to reflect better the water quality of estuaries in the tropical region. The hypothesis tested is that the biological aspects are the ones that best reflect the state of the water quality because they are formed by a very diversified group, with different levels of tolerance and the genetic information incorporated in their biomass, able to reflect changes in the environment in temporal and spatial scale. The study was carried out in two tropical estuaries located in the state of Paraíba, Brazil, the Mamanguape River estuary and the Paraíba do Norte River estuary, both with different uses and occupations of the soil. The estuaries were divided into 4 zones with three points, each containing three sample replicates. To evaluate if there were significant differences between the zones, periods and estuaries for the determined indicators, a PERMANOVA was performed. However, when evaluating the community of macrobenthic, it was possible to perceive that this increase of eco-exergy is due to the presence in high amount of the exotic mollusk *Brachdones*, increasing biomass and consequently the index, thus showing the importance of the study of community composition. The specific eco-exergy reflected as expected, presenting lower values in more disturbed places. The places where the highest values were obtained for the Shannon were observed the presence of tolerant species in the majority, thus justifying the high values of the index in places of impact. The TRIX was higher in the estuary of the Paraíba River, due to the greater impact due to the anthropic activities suffered in this, however, did not differentiate as expected from the Mamanguape River estuary considering that it has lower anthropic activity. Thus, it was concluded that the biological indicators together reflect better the environmental quality and that the environmental indicator can be used in a complementary way and not in a unique way.

**Keywords:** benthic macroinvertebrates, TRIX, eco-exergy and specific eco-exergy, Shannon-Wiener

## 1.INTRODUÇÃO

A avaliação da qualidade do ecossistema é um processo primordial para a condução de programas de biomonitoramento e o desenvolvimento de políticas ambientais adequadas. Para isso são necessárias metodologias que reflitam os diferentes graus de contaminação a que os ecossistemas estão submetidos (SALAS et al, 2005), podendo utilizar os indicadores biológicos e ambientais que podem auxiliar na melhor determinação da qualidade ambiental (PENG et al, 2014).

Entre os indicadores biológicos, estão os baseados na riqueza e abundancia da comunidade como o índice de diversidade de Shannon-Wiener (SHANNON E WEAVER, 1963) que é de grande importância na avaliação da qualidade ecológica e ambiental do ecossistema, além de ser independente do tamanho das amostras (MELO, 2008). Este índice foi utilizado em pesquisas para estudo do estado ecológico (YAN et al, 2017) e analisado o estresse sofrido pela comunidade avaliada (MAGURRAN, 2004).

Outros indicadores são os termodinâmicos, entre eles a eco-exergia e eco-exergia específica que assim como o índice de diversidade, também utiliza as comunidades biológicas para seu cálculo. A eco-exergia, foi introduzida na ecologia no final da década de 1970 e ela reflete o grau de desenvolvimento do ecossistema, sua complexidade e crescimento (SILOW E MORKEY, 2010). O índice agrega informações total transportada pela biomassa dos organismos, uma maior proporção de eco-exergia no sistema significa que este atingiu melhor equilíbrio (BASTIANONI E MARCHETTINI, 1997). A eco-exergia específica, independe do valor da biomassa, ela irá aumentar com o desenvolvimento da rede ecológica, ou seja, quanto melhor for as condições ambientais encontradas, melhor será seu desenvolvimento, pois quanto mais íntegro, maior será seu valor (JORGENSEN, 2005).

Vários estudos foram realizados utilizando a eco-exergia como indicador em ecossistema lacustre (BASTIANONI E MARCHETTINI 1997; XU et al, 2002; SALLAS et al, 2005) reservatórios (MOLOZZI et al, 2013), estuários (JORGENSEN et al, 2002, PATRÍCIO et al, 2009; VERÍSSIMO et al, 2012) e foi observado que a eco-exergia e eco-exergia específica exibiram diferentes respostas a várias condições ambientais sugerindo que a eco-exergia e eco-exergia específica, são indicadores complementares, podem ser usadas de forma confiável para avaliar a qualidade do ecossistema e como indicadores funcionais de bioavaliação de ecossistemas aquáticos (LI et al, 2013).



Para utilização e aplicação desses indicadores biológicos, entre os vários organismos presentes nos estuários, os macroinvertebrados bentônicos tem sido utilizado com frequência, principalmente pelas características da comunidade tais como: possuem baixa mobilidade, viverem em estreita associação com o substrato, apresentarem espécies com diferentes ciclos de vida e diferentes níveis de tolerância a contaminações ou outras situações de stress, o que permite usá-los com indicadores ambientais (SOUSA, 2016). Que permitem determinar a qualidade ecológica desses sistemas, por isso, essas comunidades têm sido amplamente utilizadas como uma ferramenta eficaz para a avaliação ambiental dos sistemas litorâneos (CARVALHO et al, 2010).

O índice de estado trófico também pode ser utilizado para avaliação da qualidade de ecossistemas aquáticos utilizando parâmetros físicos e químicos da água para sua determinação. Para estuários é utilizado o método TRIX (Trophic Index), proposto por (VOLLENWEIDER et al, 1998). Em várias pesquisas o índice TRIX teve bons resultados (JUNIOR et al, 2012; TAVARES et al, 2014, BÉJAOUÏ et al, 2016). Este índice agrega nutrientes, estado biológico por meio da clorofila-a e distúrbio ambiental na qualidade da água pelo oxigênio dissolvido, e apresenta vantagens por ser uma metodologia mais fácil e de simples aplicação (JUNIOR et al, 2012).

Desse modo, o presente estudo visa avaliar quais indicadores, os biológicos ou ambiental, são mais sensíveis em detectar a qualidade ambiental de estuários tropicais. Testamos a hipótese que os aspectos biológicos são os que melhor refletem o estado da qualidade da água embasados na premissa que os macroinvertebrados bentônicos por serem formados por um grupo bastante diversificado, com diferentes níveis de tolerância e a informação genética incorporada em sua biomassa, são capazes de refletir melhor as alterações no ambiente o que os tornam mais sensíveis as alterações do meio em estuários tropicais quando comparado ao indicador ambiental, que poderá refletir apenas ações antrópicas ocasionadas por um curto período de tempo.

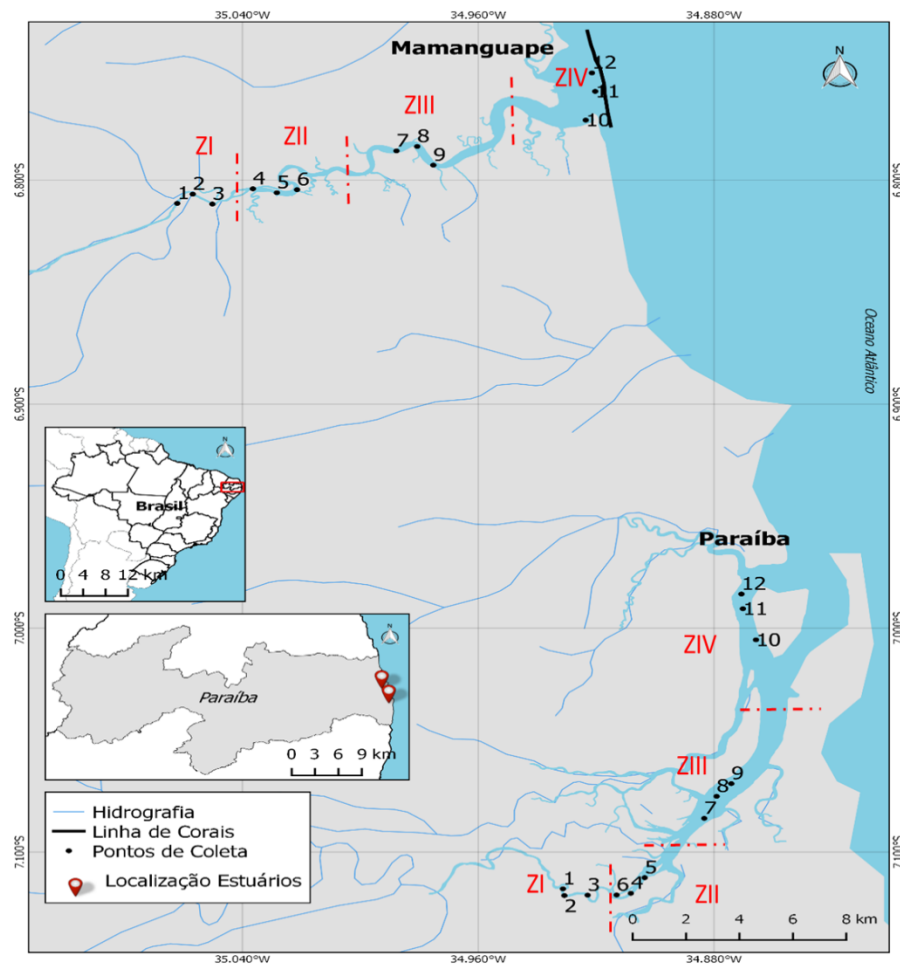
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

Este estudo foi realizado em dois estuários localizados no estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, o estuário do Rio Paraíba do Norte e o estuário do Rio Mamanguape (Figura 1). Os estuários escolhidos para estudo diferem principalmente pelo uso e ocupação do solo, sendo o estuário do rio Paraíba localizado próximo a centros urbanos sofrendo grande pressão populacional, enquanto o estuário do Mamanguape fica localizado em uma área de proteção ambiental.

Localizados na região de clima tropical do Brasil, o clima do estado é do tipo As segundo classificação de Koppen-Geiger, a temperatura pode variar atingindo entre 25°C e 30°C (ALVARES et al, 2013). O período de chuva compreende entre os meses de junho a agosto e o de seca entre dezembro e março (CPTEC, 2016).

Figura 1 - Localização geográfica dos estuários do Paraíba do Norte e Mamanguape, Paraíba, Brasil com zonas e pontos amostrais.



O estuário do Rio Paraíba do Norte apresenta comprimento de 22 Km, está localizado na porção oriental do estado da Paraíba (GUEDES et al, 2011), possui como afluentes os rios Sanhauá, Paroeira, Tibiri, Tambiá, Mandacarú, Guia e Ribeira (GUEDES et al, 2011). Possui em suas margens, centros urbanos e recebe influência direta das atividades urbanas, como por exemplo o despejo de resíduos domésticos (MARCELINO et al, 2005). Além disso é impactado por plantações de cana de açúcar e atividades de carcinocultura (VAN DER LINDEN et al, 2017).

O estuário do Rio Mamanguape possui 25 Km de comprimento, está localizado no litoral norte do Estado da Paraíba em uma Área de proteção ambiental - APA da Barra de Mamanguape. A mesma foi criada com o intuito de proteger habitats existente em seu interior (Mata Atlântica, manguezais, recifes costeiros, mata de restinga, dunas e falésias) e garantir o local de alimentação e reprodução do peixe-boi marinho (*Trichechus manatus* Linnaeus, 1758). Possui ecossistemas diversos como praias arenosas com cordões de dunas, falésias, arrecifes costeiros, mata de restinga e de tabuleiro além de uma bem conservada área de manguezal.

## 2.2 *Desenho amostral e período de coleta*

Em cada estuário foram definidas quatro zonas (Figura 1). Em cada zona, foram estabelecidos três pontos de amostragem e em cada ponto foram coletadas 3 réplicas obtendo um total de 36 amostras por estuário. (Pontos 1 - 3 – zona I, Pontos 4 - 6 – zona II, Pontos 7 - 9 – zona III e Pontos 10 - 12 – zona IV). As coletas foram realizadas nos meses de julho/2016 (chuva) fevereiro/2017 (seca).

## 2.3 *Macroinvertebrados bentônicos*

Os macroinvertebrados bentônicos foram coletados na região subtidal em maré baixa, com auxílio de uma draga Van Veen (área 477 cm<sup>2</sup>). *In situ* as amostras foram lavadas em peneiras de abertura de malha 1,0 mm e 0,5 mm, triadas e os organismos identificados até nível taxonômico de gênero com o auxílio de chaves taxonômicas especializadas para Polychaeta (AMARAL E NONATO, 1996; AMARAL et al, 2006), Mollusca (RIOS, 1985; MIKKELSEN E BIELER, 2008; TUNNELL et al, 2010), Diptera (TRIVINHO-STRIXINO, 2011).

## 2.4 Análise física e química da água

Em cada ponto de amostragem, foi coletado um litro de água da superfície e mensurado *in situ*, oxigênio com auxílio da sonda multiparamétrica (Horiba/ U-50). Em laboratório, foi analisado as concentrações de nutrientes dissolvidos: nitrito ( $\mu\text{g/L}$ ), nitrato ( $\mu\text{g/L}$ ), amônia ( $\mu\text{g/L}$ ) e fósforo ( $\mu\text{g/L}$ ), de acordo com “Standart Methods for the Examination of Water and Wasterwater” (APHA, 2012) e a concentração da clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) foi estimada pela extração em acetona 90%, de acordo com Lorenzen (1967).

## 2.5 Biomassa

Após serem identificados, os organismos foram colocados por 72 horas em estufa a  $60^\circ\text{C}$  a fim de ser retirada toda umidade, em seguida pesados em uma balança de precisão a fim de obter o peso seco. Posteriormente, os organismos foram queimados em forno mufla por um período de 8 horas para determinar o peso seco livre de cinzas.

## 2.6 Indicadores biológicos

### 2.6.1 Índice de Shannon-Wiener

O índice de Shannon-Wiener é um dos mais utilizados, pois considera não apenas o número de espécies, mas a proporção de cada espécie em relação ao todo. Para o índice, quanto maior a diversidade de espécies, maior será o valor dele. O índice de Shannon-Wiener (SHANNON E WEAVER, 1963) é calculado baseando-se na seguinte equação: (Equação 1)

$$H' = - \sum p_i \log_2 p_i \quad eq. 1$$

Onde o  $p_i$  refere-se é a proporção de indivíduos encontrados nas espécies  $i$ .

### 2.6.2 Índice de eco-exergia e eco-exergia específica

O cálculo da eco-exergia de um ecossistema é realizado por meio da seguinte fórmula: (Equação 2).

$$\sum_{i=0}^{i=n} \beta_i C_i \quad (\text{eq. 2})$$

Onde  $\beta_i$  é o fator de ponderação que se aplica aos componentes do ecossistema, para Annelida, o valor de conversão é 133, para Diptera 167 e Mollusco 310 (JORGENSEN et al, 2005).  $C_i$  corresponde à concentração dos componentes  $i$  e  $n$  é o número de componente (JORGENSEN et al, 2005).

Já o cálculo da eco-exergia específica segundo (JORGENSEN E MEJER, 1979; SILOW E MOKRY, 2010) é realizada pela divisão do valor da eco-exergia pelo valor da biomassa total como é dada na seguinte equação: (Equação 3).

$$\text{Eco - exergia específica} = \text{Eco - exergia} / \text{Biomassa total} \quad (\text{eq. 3})$$

## 2.7 Indicador ambiental

### 2.7.1 Índice de estado trófico- TRIX

O Índice de Estado Trófico (TRIX) proposto por VOLLENWEIDER et al, 1998, tem por objetivo uniformizar os critérios de classificação do grau de enriquecimento trófico de ecossistemas estuarinos. Esse sistema de avaliação é baseado em fatores nutricionais (nitrogênio inorgânico dissolvido e fósforo total), alterações na qualidade da água (oxigênio dissolvido) e de produtividade (Clorofila  $a$ ).

Os valores são transformados (aplicando logaritmos) de modo a normalizar a distribuição. Assim, a fórmula pode ser reescrita como: (equação 4)

$$TRIX = \frac{\log_{10} [Chla * aD\%0 * NDI * PT + k]}{m} \quad (\text{eq. 4})$$

Os parâmetros  $k= 1,5$  e  $m = 1,2$  são coeficientes escalares propostos por GIOVANARDI E VOLLENWEIDER (2004), introduzidos para fixar o limite mínimo do índice e a extensão da escala trófica entre 0 e 10.

Os dados obtidos são classificados segundo a seguinte escala: < 4 ultraoligotrófico, 4 - 5 oligotrófico, 5 - 6 mesotrófico, e 6 – 10 eutrófico.

## 2.8 *Análise de dados*

Com o objetivo de testar se houve diferenças significativas entre os três fatores: zonas (I, II, III e IV), estuários (Mamanguape e Paraíba do Norte) e períodos (seca e chuva), para os índices biológicos e dados ambientais, foram realizadas análises de variância PERMANOVA (ANDERSON, GORLEY, CLARKE, 2008) com 9999 permutações e um nível de significância de  $p \leq 0,05$ .

Os dados biológicos foram transformados em raiz quadrada e para os valores de abundância, eco-exergia, eco-exergia específica utilizou-se o coeficiente de similaridade Bray-curtis. Para a análise dos dados univariados: riqueza, índice de Shannon-Weaner, foi utilizado como medida de similaridade Distância Euclidiana.

Para análise dos indicadores ambientais: nitrito, nitrato, amônia, ortofosfato, clorofila-a, e oxigênio dissolvido, os dados foram transformados em  $\log(x+1)$  e calculada a Distância Euclidiana em seguida, foi realizado o teste de pair-wise.

Todas as análises foram realizadas utilizando o software PRIMER + PERMANOVA 6.0 (2006).

### 3.RESULTADOS

#### 3.1 Índices biológicos

##### 3.1.1 Índice de Shannon-Wiener e riqueza

O índice de Shannon-Wiener apresentou maiores valores em ambos os períodos nas zonas IV, sendo a maior delas no estuário do rio Mamanguape no período da chuva (2,54) e atingindo valores mais baixos nas primeiras zonas (Tabela 2). Diferenças significativas para este índice ocorreram entre as zonas (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 11.223$ ;  $p = 0.0002$ ), estuários (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 6.9537$ ;  $p = 0.0136$ ) e entre períodos (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 8.3493$ ;  $p = 0.0087$ ).

A riqueza apresentou valores mais elevados no estuário do rio Paraíba nas zonas IV em ambos os períodos. No estuário do rio Mamanguape, a riqueza foi maior nas zonas III no período da seca e chuva. Diferenças significativas para este índice ocorreram entre as zonas (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 8.8219$ ;  $p = 0.0006$ ), não sendo significativo entre estuários (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 0,48838$ ;  $p = 0,4817$ ) e períodos (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 1,8403$ ;  $p = 0,1858$ ).

##### 3.1.2 Eco-exergia e eco-exergia específica

Analisando a eco-exergia, foi observado no estuário do rio Paraíba, que a zona IV (541,248 seca) e zona III (839,501 chuva) foram as mais elevadas, tendo a eco-exergia específica mais alta nas zonas II e IV (0,011 seca) e na zona II (163,922 chuva) (Tabela 2). No estuário do rio Mamanguape, a eco-exergia foi mais elevada na zona III (114,915 seca) e zona IV (3,436 chuva). No mesmo estuário, eco-exergia específica foi maior na zona I (0,015 seca) e na zona II (608,178 chuva). (Tabela 2).

Diferenças significativas foram observadas entre as zonas (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 3.8938$ ;  $p = 0,0001$ ), estuários (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 14.885$ ;  $p = 0.0001$ ) e entre períodos (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 1.6674$ ;  $p = 0.1454$ ). Para a eco-exergia específica diferenças significativas ocorreram entre as zonas (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 2.8609$ ;  $p = 0.0144$ ), estuários (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 3,6526$ ;  $p = 0.0257$ ) e períodos (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,47} = 90.486$ ;  $p = 0.0001$ ).

### 3.2 Indicadores físicos e químicos

#### 3.2.1 Índice TRIX

De acordo com o índice de estado trófico TRIX, no período da seca, o estuário do Mamanguape obteve maior valor na zona III (7,45) seguido pela zona I (6,69). O estuário do Paraíba atingiu maiores valores na zona II (9,83) seguido pela zona III (9,20). (Figura 2 e 3).

No período da chuva o estuário do Mamanguape obteve maior valor de TRIX na zona II (8,32), seguido pela zona III (5,02). O estuário do rio Paraíba obteve maiores na zona III (6,25), seguido pela zona IV (4,93). (Figura 2 e 3).

#### 3.3 Comunidade de macroinvertebrados bentônicos

No período da seca os macroinvertebrados bentônicos do estuário do Mamanguape apresentaram uma riqueza 17 *taxas* (Polychaeta), 2 *taxas* (Diptera) e 15 *taxas* (Mollusca) e no estuário do Paraíba do Norte 35 *taxas* (Polychaeta) e 21 *taxas* (Mollusca). No período da chuva o estuário do Mamanguape apresentou uma riqueza de 28 *taxas* (Polychaeta), 2 *taxas* (Diptera) e 19 *taxas* (Mollusco) e no estuário do Paraíba do Norte 45 *taxas* (Polychaeta) e 32 *taxas* (Mollusco).

Entre os macroinvertebrados, os que apresentaram maior abundância no período seco no estuário do Mamanguape se destaca os dípteras do gênero *Polypedilium* (46,21%) e no estuário do Paraíba os moluscos do gênero *Bracdonates* (42,71%). No período chuvoso no estuário do Mamanguape, apresentou maior abundancia os poliquetas do gênero *Laeonereis* (6,66%) e no Paraíba *Polypedilium* (30,44%). (Tabela 3). Para abundância houve diferença significativa entre as zonas do gradiente estuarino (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,45}=5.7243$ ;  $p=0,0001$ ), assim como entre os estuários (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,45}=2.8235$ ;  $p=0,0012$ ) e entre os períodos (PERMANOVA: Pseudo- $F_{3,45}=3.9533$ ;  $p=0.0001$ ).



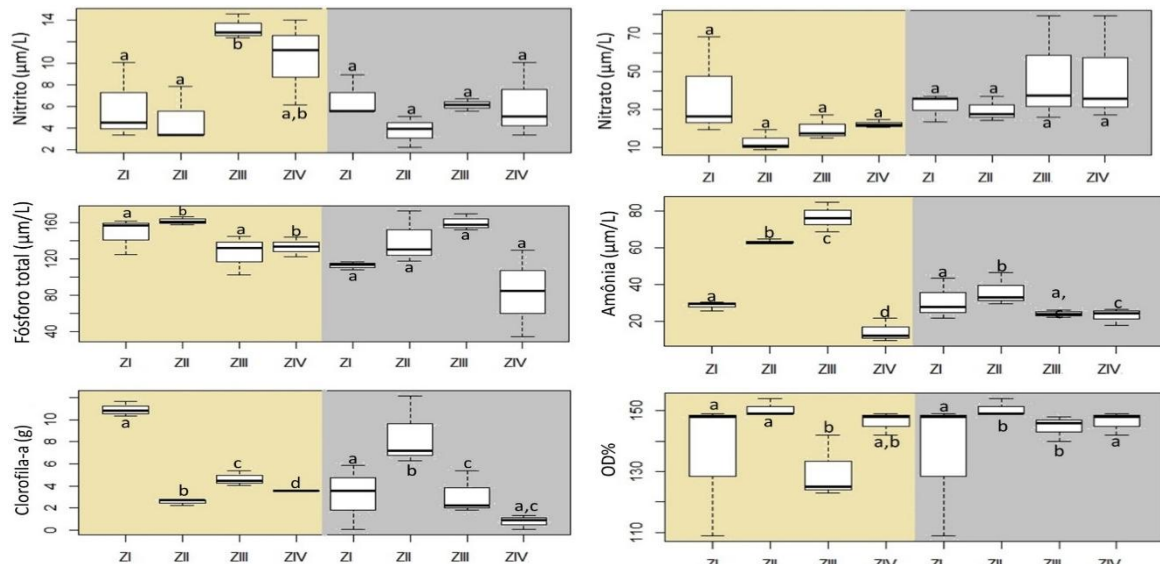


Figura 2. Boxplot com indicadores físicos e químicos utilizados para o TRIX referente as zonas I, II, III, e IV do estuário do Rio Mamanguape no período de seca (cor clara) e chuva (cor escura) respectivamente. Letras menores indicando se ocorreu ou não diferenças significativas entre as zonas. Os boxplot que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

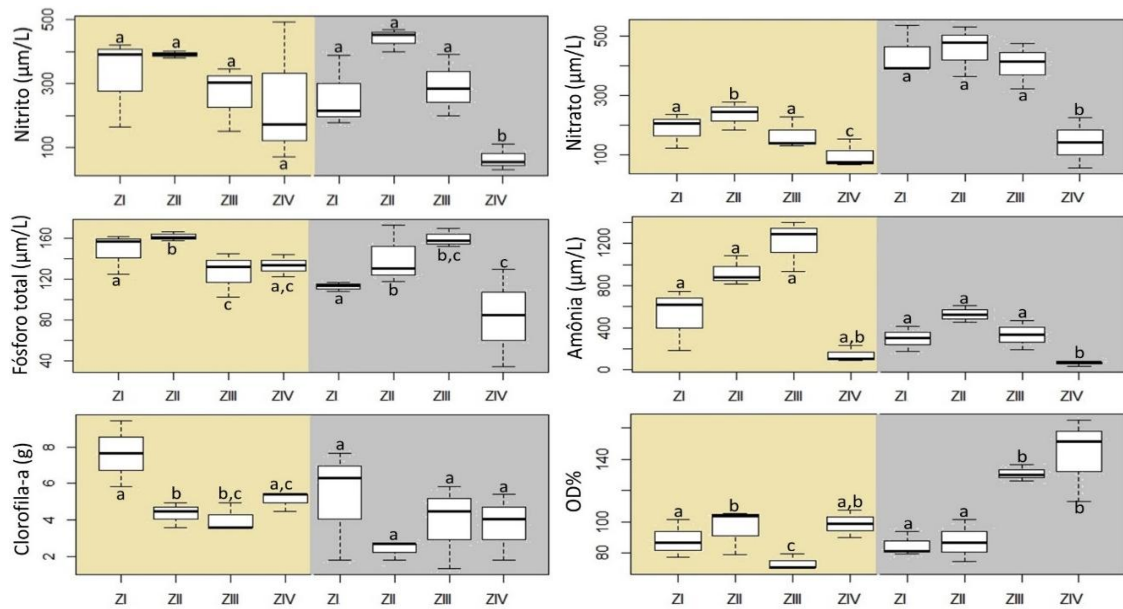
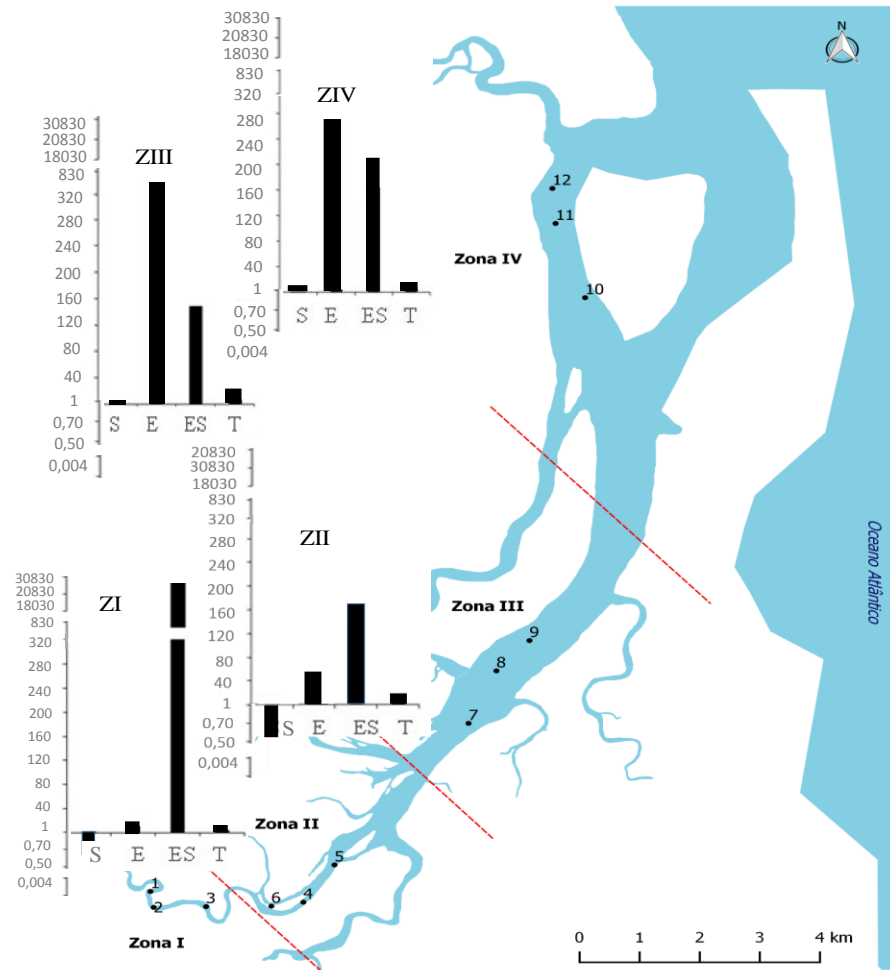


Figura 3. Boxplot com indicadores físicos e químicos utilizados para o TRIX referente as zonas I, II, III, e IV do estuário do Rio Paraíba no período de seca (cor clara) e chuva (cor escura) respectivamente. Letras menores indicando se ocorreu ou não diferenças significativas entre as zonas. Os boxplot que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes

## A) Chuva



## B) Seca

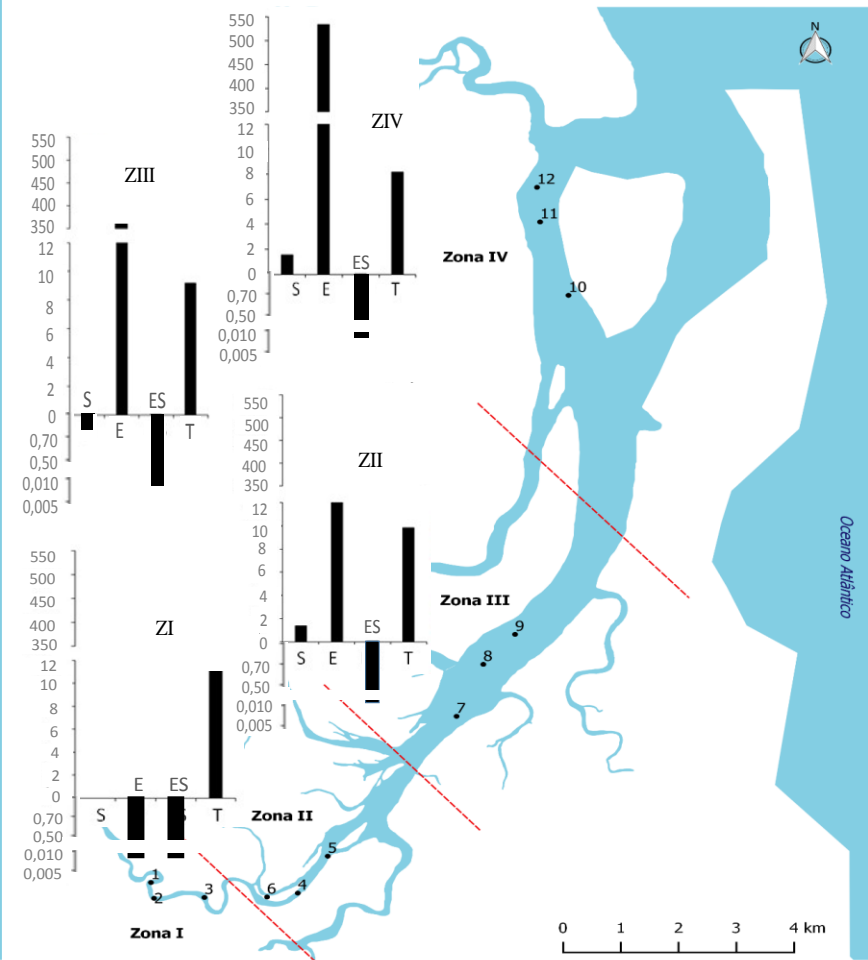
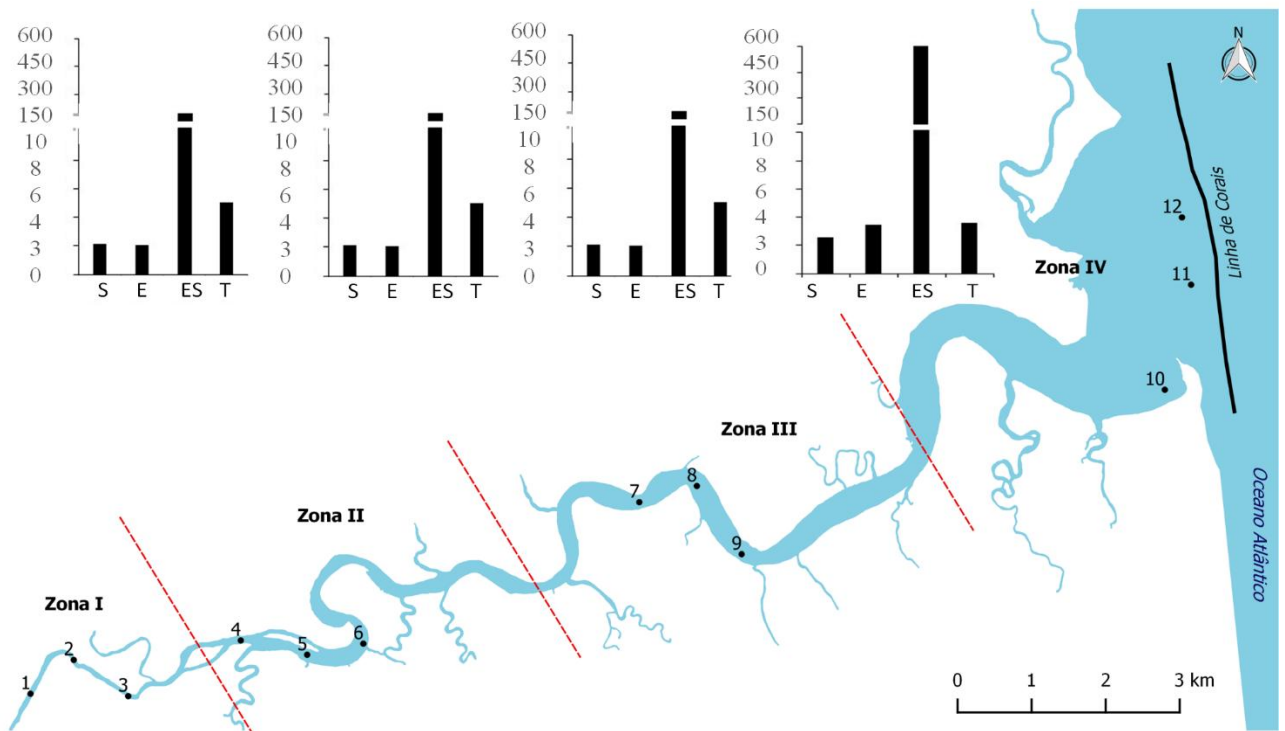


Figura 4: Estuário do rio Paraíba. Letras indicando o índice de Shannon (S), Eco-exergia (E), Eco-exergia específica (ES) e TRIX (T), no período da chuva indicado pela letra A e seca indicado pela letra B respectivamente.

## A) Chuva



## B) Seca

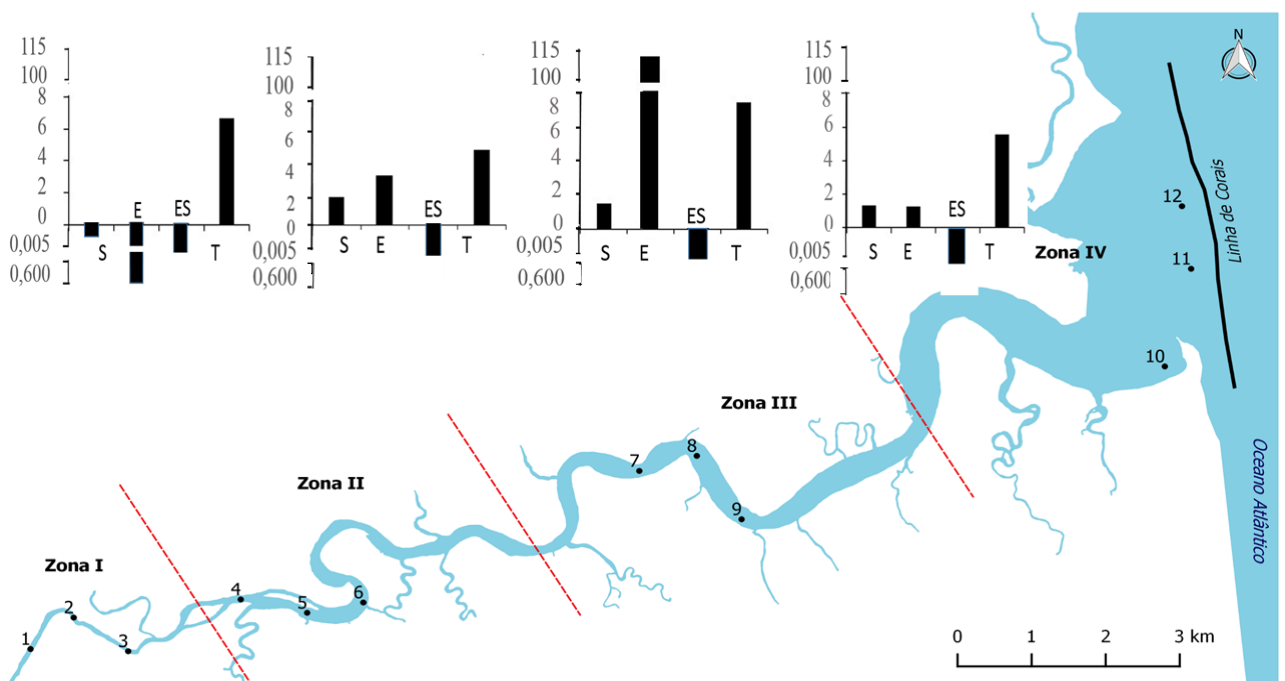


Figura 5: Estuário do Mamanguape. Letras indicando o índice de Shannon (S), Eco-exergia (E), Eco-exergia específica (ES) e TRIX (T), no período da chuva indicado pela letra A e seca indicado pela letra B respectivamente.

## 4.DISCUSSÃO

No presente estudo foi observado que apenas os indicadores biológicos não foram suficientes para melhor determinar a qualidade da água nos estuários estudados. Os índices atuaram de forma complementar para melhor caracterizar os estuários de forma que apenas um índice, sem o estudo da comunidade e sem compreender como variáveis físicas e químicas atuavam em cada um deles, chegava-se a uma conclusão incorreta.

### 4.1 Indicadores biológicos

#### 4.1.1 Índices de Shannon e riqueza

Os valores mais elevados do índice de Shannon, foi observado nas ultimas zonas (III e IV) dos estuários, o que é esperado pois, os locais mais salinos sustentam maior diversidade que locais com baixa salinidade (REMANE, 1934). Entre os organismos que apresentaram maior abundância nestas zonas estão o *Lumbrinereis* e *Anomalocardia*, indicadores de ambientes impactados, podendo o último, acumular metais pesados e transferir estes ao longo da cadeia trófica (RODRIGUES, BORGES, HENRY, 2010), sendo estes, organismos classificados como tolerantes por mesmo em meio as condições não favoráveis, estas espécies conseguem se desenvolver.

Outro macroinvertebrado que apresentou elevado valor de biomassa, foi *Laonereis*, este poliqueta é um indicador de locais com grande descarga de nutrientes (AMARAL et al, 1998). Por ser uma espécie generalista, mesmo com condições mais desfavoráveis no período da seca, esses representantes se fizeram presentes (BARROS, 2014). O estuário em que este gênero apresentou maior biomassa também apresentou menor exergia sendo assim caracterizada como um ambiente impactado (MANDAL, RAY, JORGENSEN, 2012).

A diversidade é geralmente compreendida como um indicador do estado do ecossistema e existindo algumas relações relativas à composição de comunidades naturais e variabilidade temporal, e constituem possibilidades adequadas para ser utilizadas como medidas de diversidade (SALAS et al, 2015).

O índice de diversidade de Shannon, no estuário do rio Paraíba apresentou valores inferiores quando comparados ao estuário do rio Mamanguape nos dois períodos estudados. Esse fato está associado ao estuário do rio Mamanguape ser mais integro que o estuário do rio Paraíba proporcionando assim condições mais favoráveis a maior diversidade de espécies.

A riqueza quando comparada entre estuários, foi mais elevada no estuário do rio Paraíba. Contudo este estuário é o que apresenta menor integridade, recebendo diversos impactos por atividades antrópicas, fugindo assim do esperado pois ambientes mais impactados tendem a fornecer piores condições para desenvolvimento de espécies pois apenas um pequeno número de espécies serão capazes de se adaptar com o elevado enriquecimento de nutrientes.

#### 4.1.2 índices de eco-exergia e eco-exergia específica

Neste estudo foi observado que a eco-exergia apresentou uma grande variação entre estuários e períodos de estudo. Valores elevados de exergia frequentemente está relacionado a ambientes em estado ordenado, ou seja, mais íntegros (JORGENSEN, 2007; MANDAL, RAY, JORGENSEN, 2012), o que não ocorreu nesta pesquisa.

A zona IV no estuário do rio Paraíba, foi onde a eco-exergia obteve maior valor no período da seca e na zona III no período da chuva contudo o índice TRIX não apresentou bons resultados nestas zonas. Sendo assim elevada eco-exergia do estuário do Paraíba não está relacionada a sua integridade, pois a energia contida em um ecossistema também pode ser afetada por mudanças na quantidade de biomassa e composição de espécies presentes sendo esta, expressa através da eco-exergia (BENDORICCHIO E JORGENSEN, 1997). O aumento da eco-exergia ocorreu devido a presença do molusco exótico *Brachidontes*, este foi o que apresentou maior abundância entre os estuários e entre os períodos analisados, levando a um aumento na biomassa. Este molusco foi dominante na zona III e IV no estuário do Rio Paraíba no período da seca, sendo observado a presença de poucos outros macroinvertebrados bentônicos no mesmo local de amostragem. Esse comportamento pode ser observado devido a grande descarga de nutrientes proveniente das atividades antrópicas, concordando com o observado em outro estudo onde os efeitos cumulativos de estressores antropogênicos reduziu a diversidade da assembleia de macroinvertebrados aumentando a dominância de espécies (ARMENTEROS et al, 2016).

Em situações como essa onde apenas a eco-exergia foi elevada mostrando ser um ambiente íntegro, é notável a importância do estudo de outros índices e de uma análise mais detalhada da comunidade bentônica para ser possível compreender da melhor forma a dinâmica do ecossistema e obter melhores conclusões. Para melhor avaliação do ambiente, é de grande importância o estudo da composição da comunidade (JORGENSEN E NIELSEN, 2007).

Resultados semelhantes também foram encontrados por (NIELSEN, 1994 ; ZHANG et al, 2003), onde foram observadas alterações relevantes na composição de espécies.

A eco-exergia específica é também capaz de explicar a quantidade e qualidade da biomassa do sistema sendo também um índice bastante utilizado junto a eco-exergia (SILOW & MOKRY, 2010; VASSALLO et al, 2013). Sendo assim, que a eco-exergia específica, no estuário do Paraíba do Norte mostrou menores valores, confirmando ser assim um ambiente com impacto pois a eco-exergia específica mostra valores menores nos locais com mais impactos que naqueles com melhor qualidade (SILOW & MOKRY, 2010). Essa relação ocorre pois a eco-exergia específica expressa no ecossistema, os organismos que o povoam possuem boa capacidade de adaptação e não considera a biomassa, contrastando com a eco-exergia (JORGENSEN, 2008).

#### *4.2 Indicadores físicos e químicos*

##### *4.2.1 Índice TRIX*

Nas zonas de amostragem que apresentaram maiores valores de para os indicadores biológicos, apresentam também o índice TRIX elevado. Essa situação não é coerente ao esperado pois, espera-se que pontos com maior estado de eutrofização ocorra redução da riqueza e da diversidade de espécies ali existentes devido a menor capacidade de adaptação das espécies a tal situação (MARQUES & JORGENSEN, 2002). O alto valor para o estado trófico no estuário do rio Paraíba, está relacionado aos impactos antrópicos sofridos por ele, principalmente no que diz respeito a liberação de esgoto oriundo dos centros urbanos da região próxima e da prática da carcinocultura (VAN DER LINDEN et al, 2017).

Com relação ao índice de estado trófico o TRIX mostrou valores elevados principalmente no estuário do Paraíba no Norte, indicando águas de má qualidade. Contudo, apesar do índice ter obtido maiores valores no estuário do Paraíba, seus resultados não apresentaram grande divergência quando comparado ao estuário do Mamanguape, não seguindo o esperado pois, por se tratar de estuários com diferentes formas de uso, era esperado diferenças mais relevantes quanto ao índice, demonstrando assim, que este não deve ser usado de forma única na avaliação da qualidade ambiental de ecossistemas estuarinos. Quando analisada as variáveis físicas e químicas individualmente, é possível compreender a dinâmica do ecossistema de uma maneira diferenciada de quando analisadas juntas por meio do índice, sendo assim por vez este pode refletir uma resposta diferente da qual o ambiente se encontra.

## 5. CONCLUSÕES

Os indicadores biológicos individualmente não foram capazes de refletir a qualidade ambiental dos estuários analisados contudo, quando estudados de forma complementar conseguiram refletir a qualidade desses ecossistemas de forma coesa.

A eco-exergia não refletiu a qualidade ambiental como esperado de acordo com outros estudos, contudo a partir do estudo da comunidade bentônica foi possível compreender quais fatores levou ao aumento da eco-exergia. Já a eco-exergia específica foi capaz de mostrar o impacto ambiental presente nos estuários.

O índice de Shannon também foi capaz de refletir a diferença da qualidade ambiental em ambos os estuários apresentando maiores valores no estuário mais íntegro, contudo também apresentou valores elevados nas zonas com maior impacto, indicando assim que este índice deve utilizado de forma em associação com outros índices.

O índice TRIX apresentou de forma diferenciada, o estado trófico dos estuários, contudo, se mostrou pouco relevante quanto ao resultado obtido para cada estuário, com pouca diferença em seus valores diante das inúmeras formas de contaminação que diferenciam o estuário do rio Paraíba do estuário do rio Mamanguape mostrando assim ser um índice que também deve utilizado de forma complementar em estudos e não de forma isolada.

## 8. REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., de Moraes, G., LEONARDO, J., 2013. Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* 22: 711–728.

AMARAL, A. C.; NONATO, E. F. 1996. Annelida Polychaeta - características, glossário e chaves para famílias e gêneros da costa brasileira. São Paulo: Editora da UNICAMP,

AMARAL, A. C.; MORGADO, E. H.; SALVADOR, L. B. 1998. Polychaetes as bioindicators of organic pollution on the beaches of Sao Paulo. *Revista brasileira de biologia.* 58: 307-316.

AMARAL, L.P.; FERREIRA, R.A.; LISBOA, G. S.; LONGHI, S. J.; WATZLAWICK, L. F. 2006. Variabilidade espacial do índice de diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista. *Sci. For., Piracicaba.* 41: 083-093.

ANDERSON, M.J., GORLEY, R.N., CLARKE, K.R., 2008. PERMANOVA + for PRIMER. Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E. Plymouth.

ARMENTEROS, M; ASECIO.M .D; GARCÉS, R F. ; HERNÁNDEZ C. A.; PEDRAZA, Y. H. , ALVAREZ, Y. B.; HERNÁNDEZ, C. A.; CABEZA, J.A.S. 2016. One-century decline of mollusk diversity as consequence of accumulative anthropogenic disturbance in a tropical estuary (Cuban Archipelago). *Marine Pollution Bulletin.* 113: 224-231.

APHA, A.; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association. Washington, DC. Part, 21. 2005

BASTOS, R.B.; FEITOSA, F. A. N.; MUNIZ, K. 2005. Variabilidade espaço-temporal da biomassa fitoplânctônica e hidrologia no estuário do rio Una (Pernambuco – Brasil). *Tropical Oceanography.* 33: 1–18.

BASTIANONI, S., MARCHETTINI, N. 1997. Emergy/exergy ratio as a measure of the level of organization of systems. *Ecological Modelling.* 99: 33–40.

BATISTA, T.N.F.; MONTES, M. J. F. 2014. Estado trófico dos estuários dos rios Ipojuca e Merepe-PE. *Tropical Oceanography.* 42: 22-30.

BAE, M. J.; LI, F. VERDONSCHOT, P. F. M; PARK, Y. S. 2013. Caracterização da Exergia Ecológica Baseada em Macroinvertebrados Bentônicos em Ecossistemas Lóticos. *Entropy,* 2319-2339.



BARROS, F. 2014. A framework for investigating general patterns of benthic  $\beta$ -diversity along estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 149 : 223-231.

BÉJAOUÏ, B.; ARMI, Z.; OTTAVIANI, E.; BARELLI, E.; ELLOUZ, E.; CHÉRIF, R.; TURKI, S.; SOLIDORO, C.; ALEYA, L. 2016. Random Forest model and TRIX used in combination to assess and diagnose the trophic status of Bizerte Lagoon, southern Mediterranean. *Ecological Indicators*, 293-301.

BENDORICCHIO, G., JORGENSEN, S.E., 1997. Exergy as goal function of ecosystems dynamic. *Ecological Modelling*. 102 : 5–15.

BILYARD, G. 1987. The value of benthic infauna in marine pollution monitoring studies. *Marine Pollution Bulletin*. 18 : 581–585.

BOYER, J.N., KELBLE, C. R., ORTNER, P. B., RUDNICK, D. T. 2009. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. *Ecological Indicators*. 9 : 550-57

CARVALHO, P.V.V.C.; SANTOS P. J. P.; BOTTER, C., M. L. 2010. Assessing the severity of disturbance for intertidal and subtidal macrobenthos: The phylum-level meta-analysis approach in tropical estuarine sites of northeastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*. 60 : 873-887.

CHEN, Q.; YUAN, H.; CHEN, P. 2019, Short-term effects of artificial reef construction on the taxonomic diversity and eco-exergy of the macrobenthic faunal community in the Pearl River Estuary, China. *Ecological Indicators*. 98: 772-782

CHEM, K, HUGHES, R.M, XU, S. ZHANG, J. CAI, D. WHAG B. 2014. Evaluating performance of macroinvertebrate based adjusted and unadjusted multi-metric indices (MMI) using multi-season and multi-year samples. *Ecological Indicators*. 36: 142 – 151.

COTOVICZ, L. C. J., aplicação de modelos (assets e trix) para avaliação do estado trófico e cenário futuro da eutrofização do complexo estuarino-lagunar mundaú-manguaba, (al). Niterói, uff. Programa de geoquímica, 2012.

CPTEC/INEP. Centro de previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2016.

FLORES MONTES, M. DE J., PAULO, J. G., NASCIMENTO FILHO, G. A., GASPAR, F. L., FEITOSA, F. A., SANTOS JÚNIOR, A. C. BATISTA, T. N. F., TRAVASSOS, R. K.,

PITANGA, M.E. , 2011.The trophic state of an urban estuarine complex in Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research*. 1: 408 – 411.

GAMITO, S. 2010. Caution is needed when applying Margalef diversity index. *Ecological Indicators*. 10: 550–551.

GIOVANARDI, F.; VOLLENWEIDER, R.A. 2004. Trophic conditions of marine coastal waters: experience in applying the Trophic Index TRIX to two areas of the Adriatic and Tyrrhenian seas. *Journal of Limnology*. 63 : 199-218.

GUEDES, L. S.; AMARO, V. E.; VITAL, H. 2011.Caracterização da morfologia de fundo da porção estuarina do canal do Rio Paraíba do Norte por meio do Sonar de Varredura Lateral e do Ecobatímetro. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil*, 3538-3544.

HERMANN, W. A.; 2006. Quantifying global exergy resources. *Energy*. 31: 1685–1702.

HUGHES, S. J.; FERREIRA, T.; CORTES, R. V. 2008. Hierarchical spatial patterns and drivers of change in benthic macroinvertebrate communities in an intermittent Mediterranean river. *Aquatic Conservation: marine and freshwater ecosystems*. 18 :742-760.

JORGENSEN, S. E.; MEJER, H.; 1979. A holistic approach to ecological modelling. *Ecological Modelling*. 7 : 169-189.

JORGENSEN, S. E. 1995. The application of ecological indicators to assess the ecological condition of a lake. *Ecological indicators*. 1 : 177-182.

JORGENSEN, S. E.; MARQUES, J.; NILSEN, S. N. 2002.Structural changes in an estuary, described by models and using exergy as orientor. *Ecological Modelling* . 158 : 233-240.

JORGENSEN, S. E.; 2006. Application of holistic thermodynamic indicators, *Ecological Indicators*. 6 : 24-29.

JORGENSEN, S.E. 2007.Description of aquatic ecosystem's development by ecoexergy and exergy destruction. *Ecological Modelling*, 204: 22-28.

JORGENSEN, S.E.; NIELSEN, S.N. 2007.Application of exergy as a thermodynamic indicator in ecology. *Energy*, 32 : 673-685.

JORGENSEN, S. E.; 2008. Eco-Exergy as an Ecosystem Health Indicator. *Ecological Indicators*. 977-979.

JORGENSEN, S. E.; LUDOVISI, A.; NIELSEN, S. N. 2010. The free energy and information embodied in the amino acid chains of organisms. *Ecological Modelling*. 2388–2392.

JORGENSEN, S.E. 2010. Ecosystem services, sustainability and thermodynamic indicators. *Ecological Complexity*. 7: 311-313.

JUNIOR, L. C. C.; BRANDINI, N.; KNOPPERS, B. A.; SOUZA, W. F. L.; MEDEIROS, P. R. P. 2012. Comparação de Modelos e Índices para Avaliação do Estado Trópico do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, (AL). *Geochimica Brasiliensis*, Ouro Preto, 26: 7-18.

LAMPARELLI, M.C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

LEVINTON, J. S. 2013. *Marine biology: function, biodiversity, ecology*. New York: Oxford University Press. 420

LINHARES, M. S.; CALLISTO, M. MARQUES, J. C. 2018. Thermodynamic based indicators illustrate how a run-of-river impoundment in neotropical savanna attracts invasive species and alters the benthic macroinvertebrate assemblages' complexity. *Ecological Indicators*, 88: 181-189.

LI, F.; BAE, M, J.; KWON, Y. S.; CHUNG, N.; HWANG, S. J.; PARQUE, S. J.; PARQUE, H, K.; KONG, D. S.; PARQUE, Y. S. 2013. Exergia ecológica como um indicador dos impactos do uso da terra em guildas funcionais em ecossistemas fluviais. *Modelagem Ecológica*, 252: 53-62.

MAGURRAN, A.E. 2004. *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Science Ltd, Oxford, 215.

MARQUES, J.C., JORGENSEN, S.E. 2002, Three selected ecological observations interpreted in terms of a thermodynamic hypothesis. Contribution to a general theoretical framework. *Ecological Modelling*. 158 : 213–221.

MARQUES, J.C.; NILSEN, S. N.; PARDAL, M. A.; JORGENSEN, S. E. 2003. Impact of eutrophication and river management within a framework of ecosystem theories. *Ecological Modelling*. 166: 147-168.

MANDAL, S.; RAY, S.; JORGENSEN, S. E. 2012. Exergia como um indicador: Observações e um modelo de ecossistema aquático. *Informática Ecológica*. 12 : 1-9.

MACEDO, D.; CALLISTO, M.; MAGALHÃES-JR, A. P. 2011. Restauração de Cursos d'água em Áreas rbanizadas: Perspectivas para a Realidade Brasileira. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 16: 127-139.

MARCELINO, R. L.; SASSI, R.; CORDEIRO, T. A. COSTA C. F. 2005. Uma abordagem sócio-econômica e sócio-ambiental dos pescadores artesanais e outros usuários ribeirinhos do Estuário do Rio Paraíba do Norte, estado da Paraíba. *Tropical Oceanography*. 33 :183-197.

MARTINS, C. C.; GOMES, F. B. A.; FERREIRA, J. A.; MONTONE, R. C. 2008. Marcadores orgânicos de contaminação por esgotos sanitários em sedimentos superficiais da baía de Santos, São Paulo. *Quim. Nova*, 31 : 1008-1014.

MELO, A.S. 2008. O que ganhamos 'confundindo' riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade? *Biota Neotropica* 8: 21–27.

MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M., KJERFVE, B. 2012. *Princípios de Oceanografia física de estuários*. Edusp, São Paulo, 414.

MIKKELSEN, P. M.; BIELER, R. *Seashells of southern Florida: living marine mollusks of the Florida Keys and adjacent regions, Bivalves*. Princeton (Princeton): University Press, 2008.

MOLOZZI, J.; SALAS, F.; CALLISTO, M., MARQUES, J. C.; 2013. Thermodynamic oriented ecological indicators: Application of Eco-Exergy and Specific Eco-Exergy in capturing environmental changes between disturbed and non-disturbed tropical reservoirs. *Ecological Indicators* , 24: 543-551.

MOTA, S. *Introdução à engenharia ambiental*. 4. ed. Rio de Janeiro: Abes, 388p. 2006.

MUNIZ, P. AND PIRES, A.M.S.; 1999. Trophic structure of polychaetes in São Sebastião Channel (southern Brazil). *Marine. Biology*. 134 : 517-528.

NIELSEN, S.N., 1994. Modelling structural dynamic a Danish shallow lake. *Ecological Model-*

ling 73: 13–30.

NIXON S.W. 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*. 41: 199-219.

ODUM, E.P. Trends expected in stressed ecosystems. *Bioscience* 35, 419–422. 1988.

PRABHAKRAN, K; NAGARAJAN, R; FRANCO M. F.; KUMAR, A. A. 2017. Biomonitoring of Malaysian aquatic environments: A review of status and prospects. *Ecology & Hydrobiology*. 17 : 134-147.

PATTEN, B.C.; FATH, B.D.; CHOI, J.S.; BASTIANONI, S.; BORRETT, S.R.; BRANDT-WILLIAMS, S.; DEBELJAK, M.; FONSECA, J.; GRANT, W.E.; KARNAWATI, D.; MARQUES, J.C.; MOSER, A.;

MÜLLER, F.; PAHL-WOSTL, C.; SEPPELT, R.; STEINBORN, W.H. AND SVIREZHEV, Y.M.; 2002. Complex Adaptive hierarchical systems. In: Constanza, R., Jorgensen, S. E. *Understanding and Solving Environmental Problems*, 21 : 41–94

REMANE, A. 1934, Die Brackwasserfauna. *Zoologischer Anzeiger* 7 34-74.

RIOS, E. C. Seashells of Brazil. In *Seashells of Brazil*. Museu Oceanográfico da Fundação Universidade do Rio Grande, 1985.

RIOS, R. I.; MAZZONI, R. 2014. Measuring diversity: looking for processes that generate diversity. *Natureza & Conservação*. 12: 156-161.

RODRIGUES, A. M. L.; BORGES, A. C.; HENRY, S. G. G.; 2010. Aspectos da biologia e ecologia do molusco Bivalve *Anomalocardia Brasiliensis* (Gmelin, 1791) (Bivalvia, Veneridae)). *Brazilian Journal of Biosciences*. Instituto de Biociências. Porto Alegre. 8 : 377-383.

SANTOS, M. M. F. Impactos ambientais no estuário do rio Formoso a partir da confluência dos rios Ariquindá/Formoso, Tamandaré (PE). Recife, 2002.

SANTOS, K. P.; Macroinvertebrados bentônicos e parâmetros físico-químicos como indicadores da qualidade da água de microbacias utilizadas para o abastecimento público da região metropolitana de Goiânia. Goiânia, 2015.

SALAS, F., MARCOS, C., PÉREZ-RUZAFÁ, A., MARQUES, J.C. 2005. Application of the exergy index as ecological indicator of organical enrichment areas in the Mar Menor lagoon (south-eastern Spain). *Energy*, 30 : 2505-2522.

SALAS, F., MARCOS, C., PÉREZ-RUZAFÁ, A., MARQUES, J.C.; 2005 Application of the exergy index as ecological indicator of organical enrichment areas in the Mar Menor lagoon (south-eastern Spain). *Energy*. 30 : 2505–2522.

SALAS, F., TEIXEIRA, H., MARCOS, C., MARQUES, J. C., PÉREZ RUZAFÁ, A. 2008. Applicability of the trophic index TRIX in two transitional ecosystems: the Mar Menor lagoon (Spain) and the Mondego estuary (Portugal). *Journal of Marine Science*. 1-7

SOUSA, P. M. R. Evolução das comunidades de macroinvertebrados bentónicos do estuário do Tejo nas últimas duas décadas: efeitos das alterações nas redes de Saneamento básico e/ou das alterações climáticas? Lisboa. 1977.

SHI, X. LIU, J. YOU, X. BAO, K. MENG, B. Shared effects of hydromorphological and physico-chemical factors on benthic macroinvertebrate integrity for substrate types. *Ecological Indicators*, 23. 2018.

SHANNON, C. E. WIEVER, W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

SHANNON, C.E., WEINER, W. 1963 The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Chicago. 117p.

SILOW, E.A.; MOKRY, A.V.; 2010. Exergy as a tool for ecosystem health assessment. *Entropy*, 12: 902–925.

TAVARES, J. L.; CALADO, A. L.A.; FONTES, R. F. C. Estudos iniciais para o uso do índice TRIX para análise do nível de eutrofização no estuário do Rio Potengi – Natal-RN Brasil. *Revista AIDIS*, v. 7, n. 3, p. 297-308, 2014.

TUNDISI, J.G.; MASTUMURA-TUNDISI, T.; PERIOTTO, N.A. 2012. Exergy and ecological services in reservoirs. *Brazilian Journal of Biology*. 72: .979.

TUNNELL JR, J.W. *Encyclopedia of Texas Seashells: Identification, Ecology, Distribution, and History*. Texas: A&M University Press, 2010.

TWEEDLEY, J. R. WARWICK, R. M.; VALESINI, F.J.; PLATELL, M.E.; POTTER, C.; 2012. The use of benthic macroinvertebrates to establish a benchmark for evaluating the environmental quality of microtidal, temperate southern hemisphere estuaries. *Marine Pollution Bulletin*. 64: 1210- 122.

TRIVINHO-STRIXINO, S. *Larvas de Chironomidae: Guia de identificação*. São Carlos: gráfica UFScar, 2011.

PATRÍCIO, J., NETO, J. M., TEIXEIRA, H., SALAS, F., MARQUES, J. C. 2009. The robustness of ecological indicators to detect long-term changes in the macrobenthos of estuarine systems. *Marine Environmental Research*, 68: 25–36.

ULANOWICZ, R., 1986. *Growth and Development: Ecosystem Phenomenology*. Springer, New York.

VAN DER LINDEN, P.; MARCHINI, A.; SMITH, C. J.; DOLBETH, M.; SIMONE, L. R. L.; MARQUES, J. C.; PATRÍCIO, J. 2016. Functional changes in polychaete and mollusc communities in two tropical estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 17: 23-51.

VASSALLO, P., PAOLI, C., SCHIAVON, G., ALBERTELLI, G., FABIANO, M., 2013. How ecosystems adapt to face disruptive impact? the case of a commercial harbor benthic community. *Ecological Indicadores*. 24: 431–438

VERÍSSIMO, H.; NETO, J. M.; TEIXEIRA, H.; FRANCO, J. N.; FATH, B. D.; MARQUES, J.C. PATRÍCIO, J. 2012. Ability of benthic indicators to assess ecological quality in estuaries following management. *Ecological Indicators*. 19 ;. 130-143

VOLLENWEIDER, R. A.; GIOVANARDI, F.; MONTANARI, G.; RINALDI, A., 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, 9 : 329-357.

WETZEL, C.E., LANGE-BERTALOT, H., MORALES, E.A., BICUDO, D. DE C., HOFFMANN, L. L. 2012. *Ector. Bicudoa amazonica* gen. nov. et sp. nov. (Bacillariophyta) a new freshwater diatom from the Amazon basin with a complete raphe loss in the Eunotioid lineage. *Phytotaxa* 75: 1-18.

WILDSMITH, M .D.; ROSE, T. H.; POTTER C.; WARWICK, R. M.;CLARKE, K. R.; 2011. Benthic macroinvertebrates as indicators of environmental deterioration in a large microtidal estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 62 : 525-538.

WU, F.; TONG, C.; FENG, H.; GU, J.; SONG, G. 2019. Effects of short-term hydrological processes on benthic macroinvertebrates in salt marshes: A case study in Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 218: 48-58.

XU, F.; DAWSON, R. W.; TAO, S.; LI, B.; CAO, J.; 2002. System-level responses of lake to chemical stresses using exergy and structural exergy as ecological indicators *Chemosphere*. 46 : 173-185.

YAN, J., XU, Y., SUI, J., LI, X., WANG, H., & ZHANG, B. 2017. Long-term variation of the macrobenthic community and its relationship with environmental factors in the Yangtze River estuary and its adjacent area. *Marine Pollution Bulletin*, 123: 339–348.

YI, Y. SUN, J. YANG, Y. ZHOU, Y. TANG, C. WANG, X. YANG, Z.. 2018. Habitat suitability evaluation of a benthic macroinvertebrate community in a shallow lake. *Ecological Indicadores*, 90 : 451- 459.

ZARDO, D. C. 2013. Variação espaço-temporal na abundância de ordens e famílias de macroinvertebrados bentônicos registrados em área de nascente, Campo Verde-MT. *REVISTA UNIARA*, v.16, n.1.

ZHANG, J., JORGENSEN, S.E., TAN, C.O., BEKLIOGLU, M.A., 2003. Structurally dynamic modeling-Lake Mogan, Turkey as a case study. *Ecological Modelling* 164 : 103–120.

ZHANG, J., A structurally dynamic approach to ecological and environmental models. Ph.D. Thesis. University of Copenhagen. 2004.

ZHANG, J.; GURKAN, Z.; JORGENSEN, S. E. 2010. Aplicação da eco-exergia para avaliação da saúde do ecossistema e o desenvolvimento de modelos estruturalmente dinâmicos, *Modeling Ecological*, 221: 693 -702.



## **ANEXOS**

## ANEXOS

Tabela 1. Composição da comunidade bentônica nos estuários do Rio Paraíba e Mamanguape nos períodos de seca e chuva. Valores demonstrando abundância por taxas.

Taxa	Paraíba		Mamanguape	
	Seca	Chuva	Seca	Chuva
<b><i>Polychaeta</i></b>				
<i>Aricia</i> , Savigny, 1822	0	7	0	10
<i>Autolytus</i> Grube, 1850	0	0	0	1
<i>Alita</i> Kinberg, 1865	0	0	0	1
<i>Aricidea</i> Webster, 1879.	0	2	0	1
<i>Amphictene</i> Savigny, 1822	0	0	0	1
<i>Armandia</i> Filippi, 1861.	0	5	0	1
<i>Assiminea</i> Fleming, 1828	33	0	17	0
<i>Boccardia</i> Carazzi, 1893	0	0	0	2
<i>Cossura</i> Webster & Benedict, 1887	0	0	0	1
<i>Cirrophorus</i> , Ehlers, 1908	0	0	0	0
<i>Capitella</i> , Blainville, 1828	0	1	0	1
<i>Cabira</i> Webster, 1879	0	0	0	1
<i>Caulleriella</i> , Chamberlin, 1919	0	0	0	0

<i>Clymenella</i> Verrill, 1900	0	0	0	1
<i>Cirratulidae</i> Ryckholt, 1851	1	11	0	15
<i>Ceratocephale</i> Malmgren, 1867	1	0	0	0
<i>Diopatra</i> , Audouin & Milne Edwards, 1833	3	0	0	8
<i>Dorvillea</i> Parfitt, 1866	2	0	0	5
<i>Eulepethidae</i> Chamberlin, 1919	0	0	0	0
<hr/>				
<i>Eumida</i> Perkins, 1984	0	0	1	0
<i>Eulimastoma</i> Bartsch, 1916	2	0	0	0
<i>Exogone</i> Örsted, 1845	0	1	0	1
<i>Euphionella</i> Monro, 1936	0	1	0	0
<i>Euclymene</i> Verrill, 1900	1	2	0	11
<i>Eteone</i> Savigny, 1822	0	0	0	2
<i>Grubeulepis</i> Pettibone, 1969	0	0	0	0
<i>Goniadides</i> Intes & Le Loeuff, 1975	8	0	2	1
<i>Goniada</i> Fauvel, 1932	0	1	0	0
<i>Glycera</i> Imajima, 2003	3	1	8	2

<i>Glycinde</i> Uschakov, 1955	5	2	25	21
<i>Hemipodia</i> Kinberg, 1865	0	1	0	12
<i>Hemipodus</i> Quatrefages, 1866	2	0	1	0
<i>Isolda</i> Mueller, 1858	1	0	0	5
<i>Heteromastus</i> Eisig, 1887	1	4	1	20
<i>Kimbergonuphi</i>	3	2	0	2
<i>Lysidice</i> Lamarck, 1818	0	1	0	0
<i>Laeonereis</i> Hartman, 1945	2	113	55	24
<i>Lumbrineris</i> Day, 1963	23	48	63	8
<i>Lagis</i> Malmgren, 1866	1	0	0	0
<i>Lysarete</i> Kinberg, 1865	1	0	0	0
<i>Acromegalomma</i> , Gil & Nishi, 2017	0	2	0	6
<i>Mediomastus</i> , Hartman, 1944.	1	9	1	7
<i>Modiolus</i> , Lamarck, 1799	0	0	1	0
<hr/> <i>Magelona</i> , Müller, 1858	14	5	1	8
<i>Maldanidae</i> , Malmgren, 1867	1	0	0	0

<i>Nothia</i> , Malmgren, 1866	1	0	0	1
<i>Notomastus</i> , Sars, 1851	1	0	1	1
<i>Nematonereis</i> , Schmarda, 1861	1	0	0	0
<i>Nicolea</i> , Malmgren, 1866	2	0	0	1
<i>Nereididae</i> , Blainville, 1818	4	0	0	2
<i>Neanthes</i> , Kinberg, 1865	0	0	0	5
<i>Owenia</i> , Chiaje, 1844	6	1	0	12
<i>Pectinariidae</i> , Quatrefages, 1866	0	0	0	1
<i>Hermundura</i> , Müller, 1858	0	0	0	0
<i>Pectinaria</i> , Lamarck, 1818	0	0	0	1
<i>Polycirrus</i> , Grube, 1850	0	0	0	1
<i>Poecilochaetus</i> , Grube, 1850	0	0	0	1
<i>Periboea</i> , Ehlers, 1864	0	0	0	1
<i>Prionospio</i> , Malmgren, 1867	0	1	0	1
<i>Paraonis</i> , Grube, 1873	0	4	0	0
<i>Perinereis</i> , Grube, 1878	2	0	0	0

<i>Phylodoce</i> , Browne, 1789	1	0	0	0
<i>Spionidae</i> , Webster & Benedict, 1887	0	0	0	1
<i>Spiophanes</i> , Grube, 1860	0	0	0	4
<i>Scolelepis</i> , Blainville, 1828	0	0	0	1
<i>Syllis</i> , Lamarck, 1818	1	0	1	1
<hr/>				
<i>Scoloplos</i> , Grube, 1878	7	0	11	0
<i>Spio</i> , Fabricius, 1785	0	0	0	0
<i>Sabella</i> , Linnaeus, 1767	0	0	0	1
<i>Sabellaria</i> , Lamarck, 1818	1	0	0	0
<i>Sthenelanelia</i> , Moore, 1910	1	0	0	0
<i>Sternapis</i> , Otto, 1820	0	2	0	3
<i>Synelmis</i> , Chamberlin, 1919	0	0	0	0
<i>Sigambra</i> , Müller, 1858	1	2	1	4
<i>Schistocomus</i> , Chamberlin, 1919	1	0	0	0
<i>Timarete</i> , Kinberg, 1866	4	0	0	0
<i>Terebelide</i> , Sars, 1835	1	0	0	0

***Chironomidae***

<i>Aedokritus</i> , Roback, 1958	0	0	1	0
<i>Chironomus</i> , Meigen, 1803	0	48	0	0
<i>Polypedilum</i> , Kieffer, 1912.	312	145	312	0
<i>Tanytarsus</i> , Wulp, 1874.	0	1	0	0

***Mollusco***

<i>Anadara</i> , Gray, 1847	0	0	0	1
<i>Armandia</i> , Filippi, 1861	0	0	9	0
<i>Acteocina</i> , Gray, 1847	2	2	1	1
<i>Abra</i> , Lamarck, 1818	0	1	1	1
<i>Angulus</i> , Mühlfeld, 1811	0	0	0	1
<i>Anomalocardia</i> , Mörch, 1853	25	5	39	26
<i>Boonea</i> , Robertson, 1978	1	1	0	0
<i>Brachidontes</i> , Swainson, 1840	672	1	0	0
<hr/> <i>Cylichnella</i> , Gabb, 1873	24	5	67	8
<i>Caryocorbula</i> , Gardner, 1926	13	0	1	19

<i>Caecum</i> , Fleming, 1813	1	8	0	0
<i>Cossura</i> , Webster & Benedict, 1887	0	0	1	0
<i>Chione</i> Gray, 1838	89	1	2	18
<i>Costoanachis</i> , Sacco, 1890	3	1	0	0
<i>Epitonium</i> , Röding, 1798	0	0	0	1
<i>Eulimastoma</i> , Bartsch, 1916	0	0	0	2
<i>Gouldia</i> , Adams, 1847	1	1	5	0
<i>Haminoea</i> , Turton & Kingston, 1830	0	1	0	0
<i>Iselica</i> , Dall, 1918	0	0	0	1
<i>Lioberus</i> , Dall, 1898	0	0	0	18
<i>Lyonsia</i> , Turton, 1822	0	0	0	0
<i>Macoma</i> , Leach, 1819	1	15	13	21
<i>Nassarius</i> , Duméril, 1805	1	1	0	1
<i>Neritina</i> , Récluz, 1850	1	0	0	0
<i>Nucula</i> , Lamarck, 1799	1	0	0	1
<i>Odostomia</i> , Fleming, 1813	21	0	21	2



<i>Olivella</i> , Swainson, 1831	0	2	0	1
<i>Parvanachis</i> , Radwin, 1968	1	1	0	4
<i>Parvilucina</i> Altona, 1968	1	0	1	0
<i>Scaphopoda</i> , Bronn, 1862	11	0	0	3
<i>Solariorbis</i> , Conrad, 1865	0	0	0	1
<i>Schwartziella</i> , Nevill, 1881	0	1	0	0
<hr/>				
<i>Tellina</i> , Linnaeus, 1758	1	1	7	0
<i>Teinostoma</i> , Adams, 1853	0	0	1	1
<i>Tagelus</i> , Gray, 1847	0	1	0	1
<i>Turbonilla</i> , Risso, 1826	9	1	1	5
<i>Trachypollia</i> , Woodring, 1928	1	0	0	0
<i>Veneridae</i> , Rafinesque, 1815	3	0	0	0
<hr/>				

Tabela 2. Valores da eco-exergia e eco-exergia específica, riqueza e Shannon-Weiner nos estuários do rio Paraíba e Mamanguape nos períodos de seca e chuva dispostos por zona.

Zonas	<b>Paraíba</b>								<b>Mamanguape</b>							
	<i>Seca</i>				<i>Chuva</i>				<i>Seca</i>				<i>Chuva</i>			
	ZI	ZII	ZIII	ZIV	ZI	ZII	ZIII	ZIV	ZI	ZII	ZIII	ZIV	ZI	ZII	ZIII	ZIV
Eco-exergia	0.004	12.619	353.621	541.248	10.928	49.228	829.501	292.835	0.591	3.510	114.915	1.293	0.621	2.091	2.084	3.436
Eco- exergia específica	0,005	0,011	0,008	0,011	31,567.333	163.922	148.562	201,505	0,015	0,013	0,013	0,012	528.962	608.178	179.161	601.121
Riqueza	1	15	27	41	13	5	16	37	6	17	20	17	17	15	47	41
Shannon	0	1,34	0,87	1,56	0,73	0,58	1,34	2,23	0,56	1,35	1,47	1,34	1,36	1,23	2,14	2,54