



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

**Andrievisk Gaudêncio Pereira e Silva**

**O QUE CONTROLA O FITOPLÂNCTON EM LAGOAS COSTEIRAS  
TROPICAIS? UM MODELO PARA A LAGOA DE EXTREMOZ**

**Natal  
(2014)**

Andrievisk Gaudêncio Pereira e Silva

**O QUE CONTROLA O FITOPLÂNCTON EM LAGOAS COSTEIRAS  
TROPICAIS? UM MODELO PARA A LAGOA DE EXTREMOZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Angelini

Natal

2014

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central  
Zila Mamede. Divisão de Serviços Técnicos

Gaudencio, A. P. e Silva.

O que controla o fitoplâncton em lagoas costeiras tropicais?

Um modelo para a lagoa de Extremoz. - Natal, 2014.

45 p. : il.

Orientador : Ronaldo Angelini.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

ANDRIEVISK GAUDÊNCIO PEREIRA E SILVA

**O QUE CONTROLA O FITOPLÂNCTON EM LAGOAS COSTEIRAS  
TROPICAIS? UM MODELO PARA A LAGOA DE EXTREMOZ.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Ronaldo Angelini – Orientador

---

Dr. André Megali Amado – Co-orientador

---

Dr. Vanessa Becker – Examinador Interno

---

Dr. Odete Rocha – Examinador Externo

---

Dr. Rafael Detogni Guariento – Examinador Externo

Natal, 26 de Março de 2014

## **Agradecimentos**

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado sem a qual não seria possível cursar esse mestrado nestes dois anos.

Agradeço ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da UFRN, incluindo secretaria, corpo docente e coordenação, por terem possibilitado o andamento pleno deste estudo.

Agradeço ao CNPq que, através do edital 14/2010 – Universal e do proc. 476347/2010-6, financiou as coletas deste projeto.

Ao Prof. Dr. André Megali, por ajuda, incentivo e empenho intelectual desde a graduação.

Em especial ao Prof. Dr. Ronaldo Angelini pela contribuição, orientação, atenção, paciência, empenho e disponibilidade em todo o processo até chegarmos ao tão esperado “resultado final”.

Aos professores do Mestrado em Engenharia Sanitária, pelo apoio sempre presente e pelos ensinamentos valiosos.

Aos meus colegas de mestrado, pelo companheirismo ao longo do nosso curso.

À Renata Farias, Édson Santana, Roberto Rosa, Bruno Matos e Anízio Souza pela ajuda nas coletas de campo e análises laboratoriais.

À Prof. Dr. Vanessa Becker e a Thárssia Silva pela contribuição na base de dados do trabalho.

A todos os colegas do Lab-Limno-UFRN pela ajuda e companheirismo em todo esse tempo de trabalho.

Aos doutores Ali Ger e Rafael Guariento pelas contribuições ao trabalho.

Aos funcionários do Hotel Marista-Extremoz por possibilitar o acesso ao local das coletas.

A todos os amigos por entenderem minha ausência e permanecerem me apoiando.

Agradeço à minha mãe Maria de Fátima Silva por me proporcionar todo o sustento necessário para que eu chegasse até aqui, nunca deixando faltar nada.

Finalmente agradeço a Deus que é a base de minha convivência com todos os supra-citados. Por sua graça e misericórdia.

## Resumo

O crescimento fitoplanctônico é dependente de uma série de variáveis abióticas (nutrientes, temperatura, luz) e bióticas (predação por zooplâncton e outros fitoplanctófagos, bactérias que provocam lise celular no fitoplâncton). Neste trabalho, um modelo de compartimentos foi desenvolvido no software Stella para entender a dinâmica planctônica da Lagoa de Extremoz (RN) e simular diferentes cenários de alterações em importantes variáveis ambientais como fitoplâncton e zooplâncton. As medições foram realizadas mensalmente em dois pontos da lagoa. As variáveis de estado são fitoplâncton e zooplâncton e as forçantes são nitrogênio, fósforo e temperatura. Os resultados mostram que: a) o modelo se ajusta bem aos dados, especialmente quando algumas constantes assumem diferentes valores; b) simulações de reduções das concentrações de nutrientes diminuem a biomassa fitoplanctônica, mas o aumento dos nutrientes não favorece o crescimento; c) alterações na temperatura não modificam a biomassa fitoplanctônica; d) modificações na biomassa de zooplâncton afetam diretamente e consideravelmente o fitoplâncton, indicando um mecanismo de controle *top-down*; e) alterações nas concentrações de nutrientes modificam a biomassa do zooplâncton sugerindo um rápido fluxo de energia entre nutrientes, fito e zooplâncton e um provável ecossistema arranjado em pirâmide invertida (maior biomassa de zooplâncton do que fitoplâncton).

Palavras-chave: Eutrofização; Modelagem ecológica; Zooplâncton; Controle top-down.

## Abstract

The phytoplankton growth is dependent of several abiotic (nutrients, temperature) and biotic (predation by zooplankton) variables. In this work, a mathematical model was developed in Stella software to understand the planktonic dynamics of Extremoz Lagoon (RN) and to simulate scenarios of different environmental conditions. Data were collected monthly at two points of the lagoon. The state variables are phytoplankton and zooplankton and forcing variables are nitrogen, phosphorus and temperature. The results show that: a) the model are well coupled, especially when some constants assume different values; b) simulated nutrient concentrations reduction decreases phytoplankton biomass, but the increase of nutrients does not stimulate the growth; c) changes in the temperature does not change the phytoplankton biomass; d) changes in zooplankton biomass affect directly and reduces the phytoplankton, indicating a top-down control mechanism; e) changes in the nutrient concentration modified the biomass of zooplankton suggesting a rapid flow of energy between nutrients, phytoplankton and zooplankton and a ecosystem likely arranged in an inverted pyramid (higher concentration of zooplankton than phytoplankton).

Key words: Eutrophication; Ecological modeling; Eutrophication model; Top-down control.

## Lista de figuras

**Figura 1:** Lagoa de Extremoz nos arredores de Natal (RN). P1 e P2: locais de amostragem (07/2012 a 07/2013).

**Figura 2:** Diagrama do Modelo Extremoz construído no software Stella. Retângulos: variáveis de estado; Círculos: variáveis forçantes e/ou auxiliares; Setas Grossas: trocas de energia/matéria; Setas finas: influências de uma variável em outra; Nuvens: fontes ou sumidouros. Abreviaturas: veja texto.

**Figura 3:** a) Fitoplâncton simulado (linha sólida) pelo modelo EXTREMOZ e valores observados (Pontos) para o ponto 1; b) Zooplâncton simulado (linha sólida) e valores observados (Pontos) para o ponto 1; c) Fitoplâncton simulado (linha sólida) pelo modelo EXTREMOZ e valores observados (Pontos) para o ponto 2 (Fase de validação do modelo) e d) Zooplâncton simulado (linha sólida) e valores observados (Pontos) para o ponto 2 de amostragem da Lagoa (Fase de validação do modelo).

**Figura 4:** Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo o fósforo (PD): os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

**Figura 5:** Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo o nitrogênio dissolvido (ND): os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

**Figura 6:** Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo simultaneamente o PD e o ND: os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

**Figura 7:** Simulações do fitoplâncton com aumento e redução da temperatura (°C). Os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito do aumento de temperatura e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 2.0 °C, b) aumento de 4.0 °C, c) redução de 2.0 °C e d) redução de 4.0 °C.

**Figura 8:** Simulações do fitoplâncton com aumento e redução do zooplâncton. Os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito do aumento do zooplâncton e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 20%, b) aumento de 50%, c) aumento de 90% e d) redução de 20%, que alterou a escala do eixo de concentração fitoplanctônica.

**Figura 9:** Simulações do zooplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo simultaneamente o PD e o ND: os pontos representam o zooplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

**Figura 10:** Regressão linear entre Clorofila-a e  $p\text{CO}_2$  ( $p > 0.10$ ) para a Lagoa de Extremoz (RN).

## **Lista de tabelas**

**Tabela 1:** Método de Monte Carlo utilizado para calibração (Cal.) e validação (Val.) no modelo EXTREMOZ. Res. M. Carlo e Res. Modelo são os resíduos do método de Monte Carlo e do Modelo respectivamente. P1 e P2 são os pontos 1 e 2 de coleta dos dados.

**Tabela 2:** Valores de  $p\text{CO}_2$  em  $\mu\text{atm}$  para os meses de coleta na Lagoa de Extremoz (RN).

**Tabela A1** (Anexo): siglas e significados de constantes e parâmetros das equações que compõem o modelo Extremoz

## Sumário

1	Introdução.....	13
2	Materiais e métodos.....	15
	2.1 Área de estudo.....	15
	2.2 Campanhas amostral e laboratorial.....	16
	2.3 Descrições do modelo.....	17
3	Resultados.....	24
	3.1 Calibração e validação.....	24
	3.2 Simulações no modelo.....	26
	3.3 pCO <sub>2</sub> .....	30
4	Discussão.....	32
	4.1 Modelo.....	32
	4.2 Simulações.....	33
5	Conclusão.....	35
6	Referências bibliográficas.....	36
7	Anexo.....	43

## 1 Introdução

A eutrofização consiste no aumento das concentrações de nutrientes (principalmente nitrogênio e fósforo) em sistemas aquáticos, resultando no aumento acelerado da produção primária. É atualmente o principal problema para os ecossistemas aquáticos e um dos exemplos mais visíveis das mudanças humanas na biosfera (Howarth, 2002, Smith, 2003, Smith and Schindler, 2009). A eutrofização pode ocorrer naturalmente, como consequência da lixiviação numa bacia de drenagem ou pela retro contribuição de fósforo do sedimento. Porém, a aceleração desse processo normalmente ocorre por ação antrópica, através da descarga de efluentes agrícolas, urbanos ou industriais (Malecki et al., 2004, Reddy et al., 2007).

A eutrofização tem muitos efeitos indesejáveis como: o aumento exagerado da biomassa de fitoplâncton e de macrófitas, aumento da biomassa de algas bentônicas e epifíticas, mortandade de peixes, reduções na diversidade de espécies, redução da transparência da água, perda da qualidade da água (sabor e odor), depleção de oxigênio, alterações estéticas no corpo d'água e florações de algas tóxicas e pouco lábeis (ex: cianobactérias) (Smith and Schindler, 2009). Florações de cianobactérias potencialmente tóxicas são ocorrentes resultados da eutrofização e representam uma séria ameaça ao fornecimento de água e à sustentabilidade ecológica e econômica de vários lagos rasos tropicais (Jeppesen et al, 1991, Carpenter, 1999, Wetzel, 2001, Heisler et al., 2008, Pearl et. al., 2011).

O fósforo é apontado como principal nutriente estimulador de produção fitoplanctônica (Schindler, 1980) e é considerado o elemento chave para o controle da eutrofização. Entretanto outros nutrientes como nitrogênio e carbono também são importantes para a realização da fotossíntese por parte do fitoplâncton (Hein, 1997; Rabalais, 2002).

A concentração de nutrientes também pode determinar o potencial de produção dos organismos de um ecossistema aquático através das interações em cascata da estrutura trófica (fitoplâncton, macrófitas aquáticas, zooplâncton, peixes, etc) (Fragoso, 2009). Isso significa que alterações na base da cadeia alimentar influenciam níveis tróficos mais altos assim como mudanças em níveis mais altos podem alterar os níveis tróficos mais baixos (Jakobsen et al., 2004; Jeppesen et al., 2002a; 2002b). O efeito *bottom-up* acontece quando o controle sobre a base da cadeia (fitoplâncton) é

determinado por recursos e luz. Tal efeito vem sendo considerado como o principal regulador da biomassa fitoplanctônica (Hairston et al., 1960, Tilman et al., 1982, Griffin & Rippingale, 2001, Schippers et al., 2004, Smith & Schindler, 2009, Pearl et al., 2011). Entretanto, estudos mostraram que o fitoplâncton pode ser também fortemente regulado pelo zooplâncton (Carpenter et al., 1985, Bergquist and Carpenter, 1986, Carpenter et al., 1987, Elser and Goldman, 1991, Degans & De Meester, 2002, Muylaert et al., 2006, Low et al., 2010), caracterizando o efeito *top-down*, que o controle exercido por um nível trófico superior em um nível trófico inferior.

A temperatura também é outra variável importante como agente catalizador da biomassa fitoplanctônica (Moss et al., 2003, Llus & Keskitalo, 2008, Henneman & Petrucio, 2010, Thies et al., 2012) pois possui a capacidade de controlar as taxas biológicas como respiração, decomposição e produção (Choi, 1998).

Para entender a contribuição de cada um destes mecanismos e a interação entre eles é necessária uma abordagem inter-disciplinar e quantitativa. Neste sentido, modelos matemáticos são ferramentas úteis para prever a biomassa de algas e descrever as mudanças temporais e espaciais na diversidade de espécies e concentrações de nutrientes (Solidoro et al., 2005, Arhonditsis & Brett, 2005, Huang et al., 2005, Chao et al., 2006, Turner et al., 2014), auxiliando na simulação de cenários de impactos e consequentemente nas escolhas de estratégias de manejo mais apropriadas.

As lagoas costeiras são amplamente usadas como fonte de abastecimento e lazer levando a uma elevada quantidade de atividades humanas sobre esses sistemas, o que pode acarretar consequências ecológicas graves como a eutrofização (Esteves et al., 2008; Berkes e Seixas, 2005). A Lagoa de Extremoz é um dos principais mananciais de abastecimento da cidade de Natal, contribuindo com água para cerca de 260 mil habitantes (CAERN, 2011), além de servir como área de lazer para as populações circunvizinhas. A lagoa é circundada por indústrias, residências e propriedades agropastoris, das quais recebe efluentes, que podem aumentar as concentrações de nutrientes e intensificar o processo de crescimento fitoplanctônico e mesmo, eutrofização.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi construir um modelo de compartimentos para a Lagoa de Extremoz, destacando as variáveis de estado

fitoplâncton e zooplâncton para testar as seguintes hipóteses: 1 - Alterações nas concentrações de fósforo e nitrogênio separadamente e simultaneamente influenciam a biomassa fitoplanctônica; 2 - Alterações na temperatura também influenciam a biomassa fitoplanctônica; 3 - Alterações na biomassa do zooplâncton influenciam o fitoplâncton; 4 - Alterações nas concentrações de nutrientes (N, P e CO<sub>2</sub>) resultam em alterações no zooplâncton;

## **2 Materiais e Métodos**

### *2.1 Área de estudo*

A Lagoa de Extremoz (Fig. 1) está situada na bacia hidrográfica do Rio Doce no município de Extremoz - RN. A Lagoa de Extremoz é costeira com ligação ao mar através do Rio Doce que, por sua vez, deságua no Rio Potengi. A região é de clima tropical (Kottek et al., 2006) com média anual de precipitação de 1.600 mm, divididas em período seco no verão (em novembro com 15,5 mm de precipitação) e chuva no inverno (em junho com quase 290mm). A umidade relativa gira em torno dos 82% e a temperatura média anual do ar é de 26,6°C (variando entre 21°C e 30°C) caracterizando baixa amplitude térmica no ano (ATP, 2006).



Fig.1: Lagoa de Extremoz - Extremoz (RN). P1 e P2: locais de amostragem.

## 2.2 Campanha amostral e laboratorial

Foram realizadas coletas mensais, entre os meses de Julho/2012 a Julho/2013 para abranger um ciclo anual, em dois pontos (Fig.1): P1 – Centro da lagoa e P2 – Próximo ao ponto de captação de água para abastecimento (CAERN, Companhia Regional Natal Norte).

As amostragens foram realizadas na superfície com auxílio da garrafa de Van Dorn para análise de: nutrientes (N, P e  $\text{CO}_2$ ), biovolume fitoplanctônico, clorofila e alcalinidade. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em garrafas de polietileno e abrigadas da luz até a chegada ao laboratório. Um termômetro digital foi usado para medir a temperatura da superfície nos pontos de coleta.

Em laboratório, foram feitas as análises de alcalinidade (Golterman et al., 1978), utilizando-se o método descrito por Carmouze (1994) para estimar os valores de  $\text{pCO}_2$  na água. Logo após, as amostras foram pré-filtradas em filtros de fibra de vidro de porosidade média de  $1,2 \mu\text{m}$  (Macherey-Nagel) e os filtros foram utilizados imediatamente para determinação das concentrações de clorofila-a (extração em etanol 90% descrito no APHA, 1992). Posteriormente, as amostras foram filtradas em filtros de celulose de porosidade média de  $0,22 \mu\text{m}$  para a determinação das concentrações de nitrogênio dissolvido (Analisador de carbono e nitrogênio, TOC-TN) e fósforo dissolvido (Murphy & Riley, 1962).

Para análise quantitativa das amostras de fitoplâncton (abundância fitoplanctônica), utilizou-se o microscópio invertido com aumento de 400x (Utermöhl, 1958). Para a estimativa do biovolume fitoplanctônico ( $\text{mm}^3\text{L}^{-1}$ ) foi utilizado o método dos modelos geométricos aproximados (Hillebrand et al., 1999). Posteriormente o biovolume ( $\text{mm}^3\text{L}^{-1}$ ) foi transformado em biomassa ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) assumindo a proporção de 1/1 segundo Wetzel (1991).

Para as amostragens de zooplâncton foi usada uma rede de 0,64  $\mu\text{m}$ . Em cada ponto foi realizado um arrasto vertical de 3 metros para as análises de densidade e 10 arrastos horizontais de 3m para as análises de biomassa da camada superficial e peso seco do zooplâncton (Wetzel, 1983). A cada coleta, as soluções concentradas de zooplâncton foram armazenadas em frascos *âmbar* onde uma amostra por ponto foi fixada com formol a 3,4 % para posterior análise de densidade, e outra foi usada para a determinação do peso fresco e da biomassa zooplanctônica (Analisador de carbono e nitrogênio Shimadzu, TOC-TN). Para obtenção do peso seco foram coletados 400 espécimes (por filtro) de zooplâncton para serem dispostos em 4 filtros de fibra de vidro previamente queimados em mufla a 500 °C por 4 horas. Os filtros com os espécimes zooplanctônicos foram secos em estufa por 4 dias e posteriormente foram pesados novamente. O peso seco foi obtido subtraindo-se o peso final do peso inicial do filtro. Para tal foi usada uma balança Sartorius ME 36s. As contagens numéricas para determinação da contribuição relativa dos grupos zooplanctônicos foram feitas por contagem em câmara de Sedgewick-Rafter sob microscópio ótico (APHA, 1992).

### 2.3 Descrição do Modelo

Para a construção do modelo usou-se o software STELLA (*Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*) que simula situações reais de sistemas ecológicos dinâmicos, ao mesmo tempo em que possibilita a compreensão de diversas funções matemáticas e a leitura das saídas gráficas correspondentes (Richmond, 1987; ferracioli and Camiletti, 1998; Duvoisin, 2000).

O modelo (EXTREMOZ) construído no STELLA possui apenas duas variáveis de estado (Fito e Zooplâncton) sendo iniciado com o crescimento fitoplanctônico que é posteriormente consumido pelo zooplâncton por predação (Fig. 2):

Fitoplâncton (Phy) - Foram usados dados totais de biovolume fitoplanctônico ( $\text{mm}^3/\text{L}$  ou o equivalente  $\text{mg}/\text{L}$ ), pois existem inúmeras espécies de microalgas, o que inviabilizaria um modelo mais detalhado com mais de uma espécie.

Zooplâncton (Zoo) – Para as determinações da densidade do zooplâncton foram considerados três grandes grupos: Copepoda, Cladocera e Rotifera. O grupo Copepoda (Calanoida) representou mais de 90% da densidade total e portanto foi o único utilizado na modelagem (unidade  $\text{mg}/\text{L}$ ).

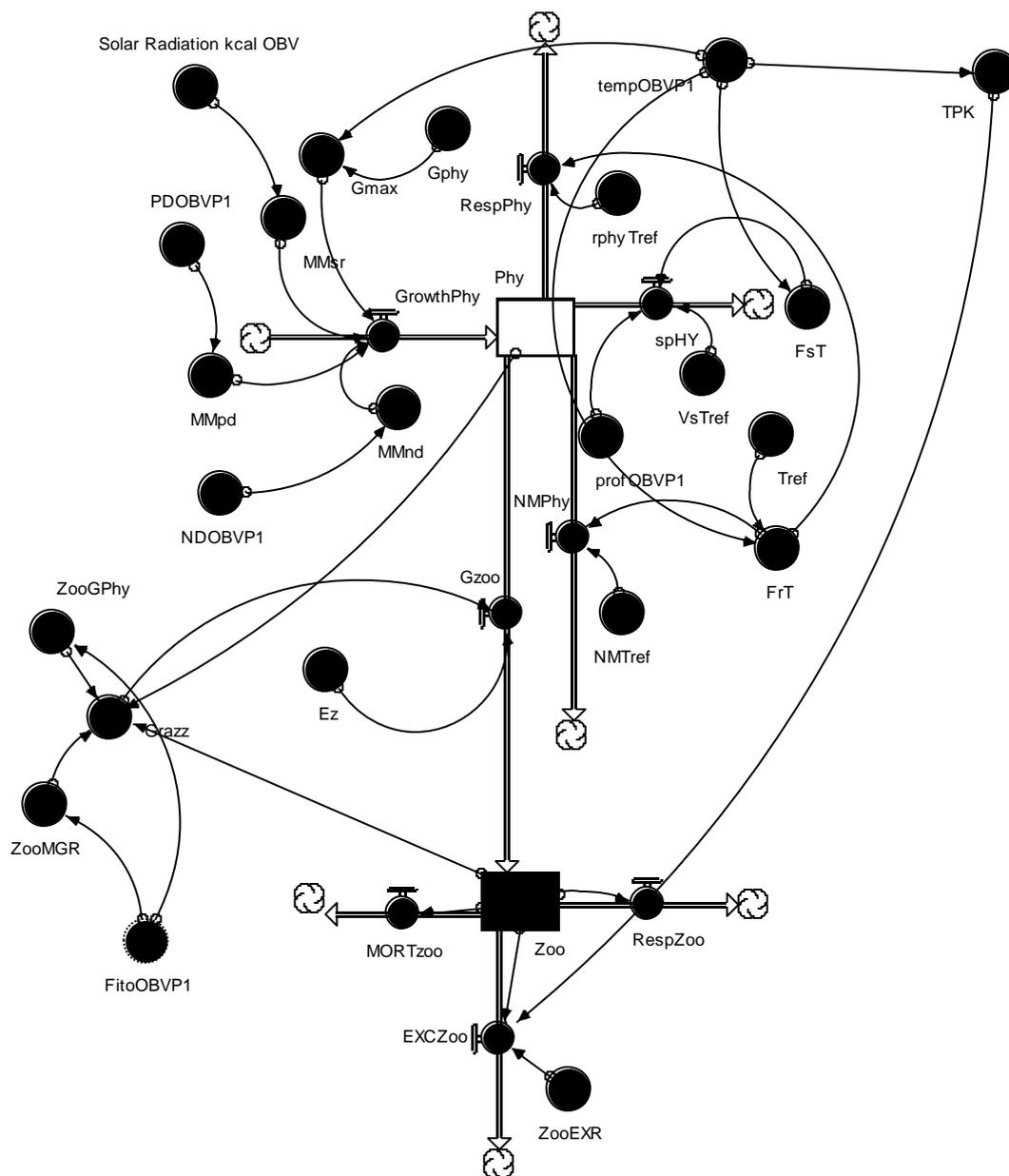


Figura 2: Diagrama do Modelo Extremoz construído no software Stella. Retângulos: variáveis de estado; Círculos: variáveis forçantes e/ou auxiliares; Setas Grossas: trocas de energia/matéria; Setas finas: influências de uma variável em outra; Nuvens: fontes ou sumidouros. Abreviaturas: veja texto.

As principais equações de *input* do modelo são:

1 - GROWTHPhy – Representa o crescimento fitoplanctônico (Phy) em função das variáveis nitrogênio dissolvido, fósforo dissolvido e radiação solar (Angelini and Petreere,

2000), que influenciam a produção primária por meio de uma combinação de diferentes expressões:

$$GROWTHPhy = (Gmax \times (MMnd \times MMpd \times MMsr)) \quad (1)$$

Onde:

Gmax é a taxa máxima de crescimento fitoplanctônica ( $\text{mg L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )

MMnd é a função de Monod para nitrogênio dissolvido (ND);

MMpd é a função de Monod para fósforo dissolvido (PD);

MMsr é a função de Monod para radiação solar;

Gmax é dado por:

$$Gmax = Gphy \times e^{(0.1 \times TEMP)} \quad (2)$$

Onde *TEMP* são os valores observados de temperatura; Gphy é um valor ajustado para a taxa máxima de crescimento.

A função de Monod também conhecida como função de Michaelis-Menten (Monod, 1942) tem esta característica:

$$MMN_{(x)} = \frac{x}{k + x} \quad (3)$$

Onde: **x** é o valor observado do nutriente (ND ou PD) ou da radiação solar; **k** é o coeficiente de meia saturação, que indica o valor do recurso que reduz o crescimento em 50% (Fragoso et al., 2009). É importante notar que o valor de MMN(x) nunca será maior que 1 e, sendo MMN um multiplicador na função GROWTHPhy (Eq. 1), ele só poderá ser um limitante de Gmax (<1) quando os valores dos nutrientes forem baixos ou indiferente no resultado final (=1, quando os valores forem máximos).

Desta forma, em baixas concentrações de fitoplâncton, os nutrientes estimulam o aumento no crescimento fitoplanctônico, mas em altas concentrações de fitoplâncton os nutrientes tem menor influência.

2 - Gzoo - Crescimento zooplanctônico em função da predação e da eficiência de assimilação (Bowie et al., 1985):

$$G_{zoo} = GRAZZ \times E_z \quad (4)$$

Onde:

$E_z$  é a eficiência de assimilação para copépodos (0.69);

GRAZZ é a predação exercida pelo zooplâncton sobre o fitoplâncton que é descrita por Bowie et al. (1985):

$$GRAZZ = ZooMGR \times \frac{Phy}{ZooGPhy + Phy} \times Zoo \quad (5)$$

Onde:

Zoo é o valor de zooplâncton simulado;

Phy é o valor do fitoplâncton simulado;

ZooGPhy é a constante de meia saturação do *grazing* e varia entre 0.6 e 1 dependendo do valor de Phy. Quando os valores de Phy forem maiores que 5.4 (valor médio de Phy observado) então ZooGPhy é igual a 1. Quando os valores de Phy forem menores ou igual a 5.4 então ZooGPhy é igual a 0.6;

ZooMGR é a taxa máxima de *grazing* para copepodos que varia entre 1.59 e 1.51 dependendo do valor de Phy. Quando os valores de Phy forem menores que 8 então ZooMGR é igual a 1.59. Quando os valores de Phy forem maiores ou iguais a 8 então ZooMGR é igual a 1.51.

Os valores de ZooMGR e ZooGPhy, assim como outros valores de constantes, foram calibrados empiricamente, isto é, o modelo era simulado e aquele valor que apresentava valores simulados para as variáveis de estado (fito e zooplâncton) mais similares aos valores observados de fito e zooplâncton. O uso de dois valores para a mesma constante de meia saturação mostra que esta deve sofrer alterações a depender das condições ambientais.

As equações de *output* para a variável Phy são:

1 - RespPhy – Respiração fitoplanctônica (Bowie et al.,1985):

$$RespPhy = rphytref \times Frt \quad (6)$$

Onde:

rphytref: taxa de respiração do fitoplâncton em temperatura de referência (20 °C) – 0.05 (Jorgensen, 1979);

Frt: taxa em função da temperatura:

$$Frt = \frac{TEMP}{Tref} \quad (7)$$

Onde TEMP é a temperatura observada e Tref é a temperatura de referência (20°C). Neste caso quando a temperatura for maior que 20° C a respiração de Phy será maior.

2 - SPhy– Sedimentação fitoplanctônica (Bowie et al., 1985):

$$SPhy = \frac{VsTref}{PROF} \times Fst \quad (8)$$

Onde:

VsTref: velocidade de sedimentação do fito na temperatura de referência (20 °C) – 0.05;

PROF é o valor da profundidade observada (m);

Fst é a função da temperatura para a velocidade de sedimentação (Tetra Tech, 1980) dada por:

$$Fst = \frac{157.5}{(0.69 \times TEMP^2) - (5.3 \times TEMP) + 177.6} \quad (9)$$

Onde TEMP são os valores observados de temperatura

3 - NMP<sub>Phy</sub> – Mortalidade não predatória (Bowie et al., 1985):

$$NMP_{Phy} = NMT_{ref} \times FrT \quad (10)$$

Onde:

NMT<sub>ref</sub> é a taxa de mortalidade não predatória em temperatura referência (20 °C) – 0.02;

As equações de *output* para a variável ZOO são:

1 - RespZoo – Taxa de respiração para zooplâncton:

$$RespZoo = 0.6 \times Zoo \quad (11)$$

O valor 0.6 foi estimado durante o processo de calibração do modelo.

2 - MortZoo – Taxa de mortalidade para zooplâncton:

$$MortZoo = 0.29 \times Zoo \quad (12)$$

O valor 0.29 foi estimado durante o processo de calibração do modelo.

3 - ExcretZoo – Taxa de excreção para zooplâncton:

$$ExcretZoo = ZooEXR \times TPK \times Zoo$$

Onde: ZooEXR é a taxa base de excreção para zooplâncton (Solidoro et al., 2005): 0.048 e TPK é o coeficiente de dependência de temperatura para excreção de zooplâncton:

$$TPK = 0.98^{(TEMP-27.1)} \quad (13)$$

O modelo foi calibrado utilizando-se os valores observados de fito e zooplâncton do ponto 1. Isto é, os valores das constantes das equações acima eram modificados para que os valores observados de fito e zooplâncton se ajustassem aos valores

simulados para estas duas variáveis de estado do modelo. Depois de calibrado, o mesmo modelo (com mesmos valores de constantes) foi simulado utilizando-se os dados observados de fito, zooplâncton, temperatura, fósforo e nitrogênio do ponto 2, caracterizando a fase de validação do modelo.

Para medir se os parâmetros fornecidos pelo modelo (valores simulados) são condizentes com o mundo real (valores observados), usou-se o método de Monte Carlo (Hammersley, 1964) através de planilha específica do Excel. Neste método, se o somatório dos resíduos obtidos com os valores simulados pelo modelo for menor que o somatório dos resíduos obtidos com os valores das 100 simulações feitas pelo método de Monte Carlo, então o modelo se ajusta mais corretamente aos valores observados, do que aquele que seria esperado ao acaso.

### **3 Resultados**

#### *3.1 Calibração e Validação*

A calibração do modelo (Figuras 3a e 3b) fez com que a simulação coincidissem com os valores observados de fitoplâncton e zooplâncton para o ponto 1 de coleta, segundo o método de qualidade de ajuste de Monte Carlo utilizado (Tabela 1). Depois, utilizando-se o mesmo modelo e mesmos valores de parâmetros e constantes e substituindo-se para os valores observados do Ponto 2 realizou-se a validação do modelo para fito e zooplâncton do ponto 2 (Figuras 3c e 3d) e os resultados também são congruentes segundo o método de Monte Carlo (Tabela 1).

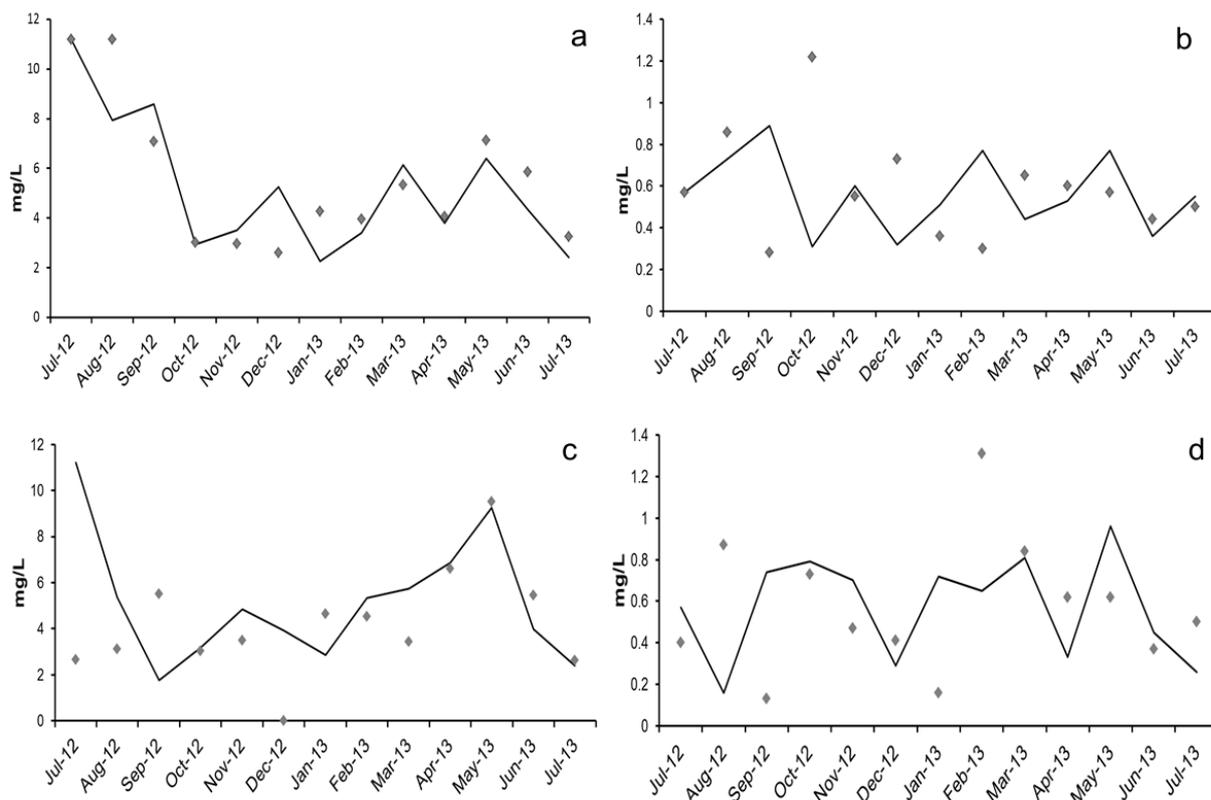


Fig. 3: a) Fitoplâncton simulado (linha sólida) pelo modelo EXTREMOZ e valores observados (Pontos) para o ponto 1; b) Zooplâncton simulado (linha sólida) e valores observados (Pontos) para o ponto 1; c) Fitoplâncton simulado (linha sólida) pelo modelo EXTREMOZ e valores observados (Pontos) para o ponto 2 (Fase de validação do modelo) e d) Zooplâncton simulado (linha sólida) e valores observados (Pontos) para o ponto 2 de amostragem da Lagoa (Fase de validação do modelo).

Tabela 1: Método de Monte Carlo utilizado para calibração (Cal.) e validação (Val.) no modelo EXTREMOZ. Res. M. Carlo e Res. Modelo são os resíduos do método de Monte Carlo e do Modelo respectivamente. P1 e P2 são os pontos 1 e 2 de coleta dos dados.

	Ponto	Res. M. Carlo	Res. Modelo	Média	Mínimo	Máximo	Iterações Válidas
Fito	P1	238.98	27.96	27.96	27.96	27.96	100
Zoo	(Cal.)	1.08	1.74	1.74	1.73	1.74	100
Fito	P2	85.91	18.23	18.24	18.23	18.23	100
Zoo	(Val.)	3.76	1.34	1.34	1.34	1.34	100

### 3.2 Simulações no modelo EXTREMOZ

Para simular possíveis impactos sobre a variável de estado Fitoplâncton do modelo EXTREMOZ os valores de Fósforo Dissolvido (PD), Nitrogênio Dissolvido (ND), Temperatura e Zooplâncton foram alterados para o ponto 1.

Para todas as simulações de aumento e redução de fósforo dissolvido não houve resposta diferenciada por parte do fitoplâncton (Fig. 4). No caso do nitrogênio, as modificações de até 50% também não alteraram o fitoplâncton (Fig. 5a, 5b e 5c) que respondeu apenas à simulação de redução de 90%, atingindo os menores valores nos meses em março e abril de 2013 (Fig.5d).

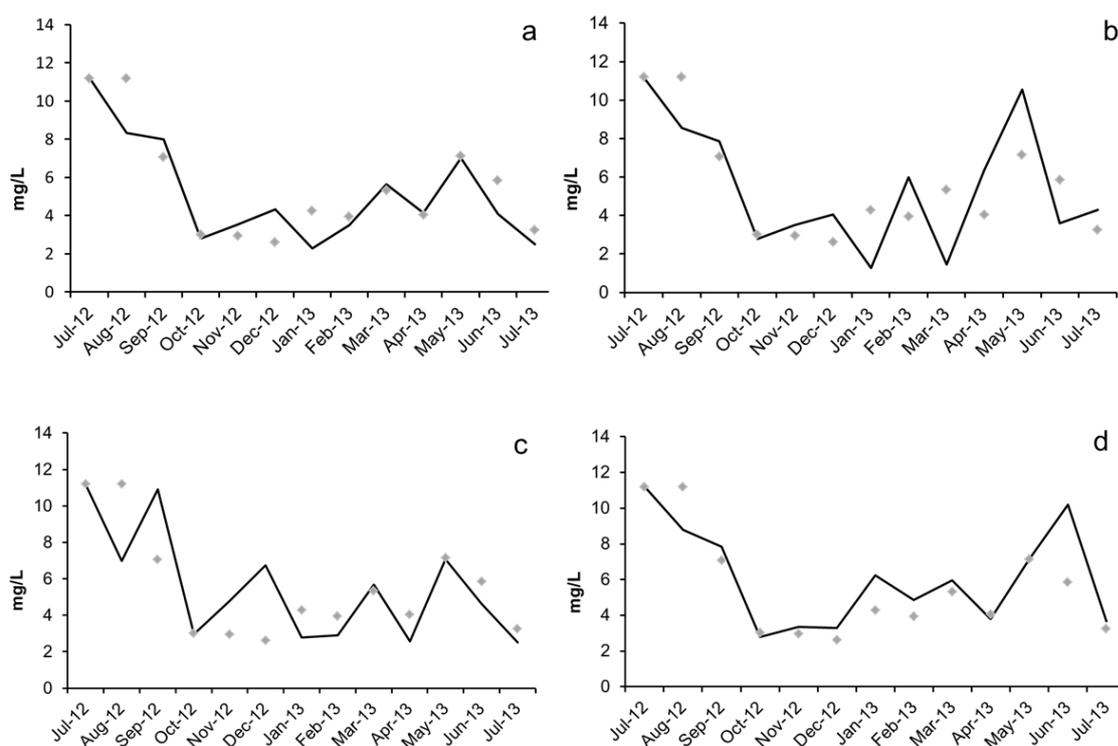


Fig. 4: Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo o fósforo (PD): os pontos representam o fitoplâncton, ou seja, sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

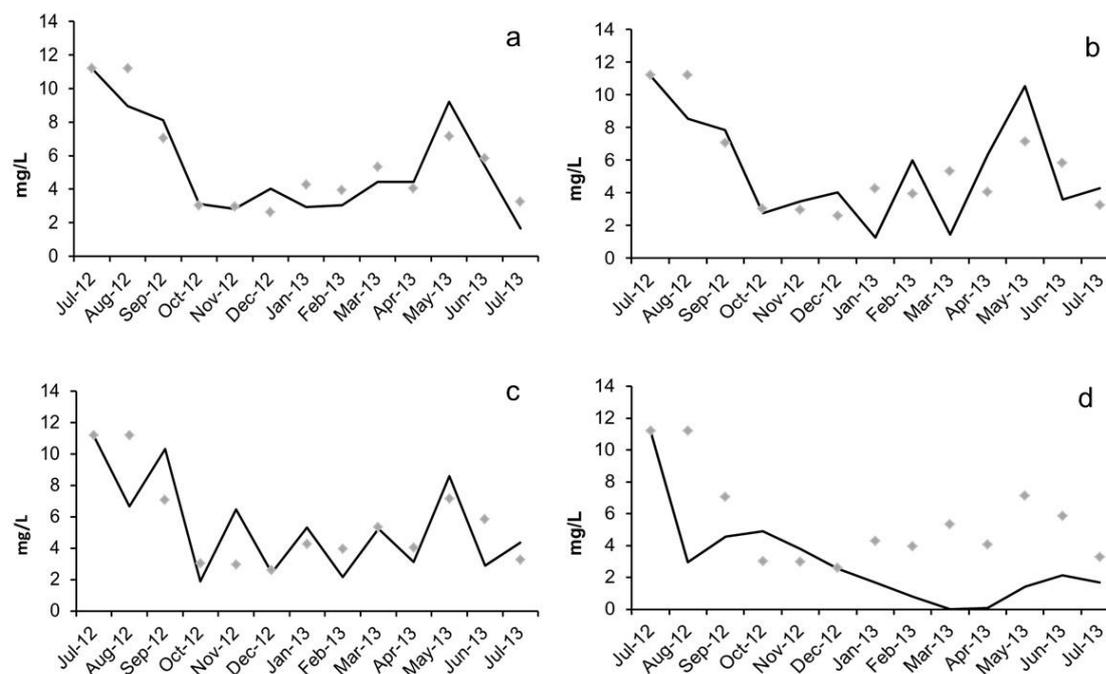


Fig. 5: Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo o nitrogênio dissolvido (ND): os pontos representam os dados reais fitoplâncton, ou seja, sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

As simulações de aumento simultâneo de Fósforo e Nitrogênio não resultaram em resposta por parte do fitoplâncton (Fig.6a e 6b), mas na redução simultânea de 50% e 90% de PD e ND, o fitoplâncton respondeu com flutuações irregulares de Julho-2012 a Maio-2013 (Fig. 6c), atingindo valores próximos à zero de Janeiro a Julho de 2013 (Fig.6d).

Para todas as simulações de aumento e redução de temperatura não houve resposta diferenciada por parte do fitoplâncton (Fig. 7).

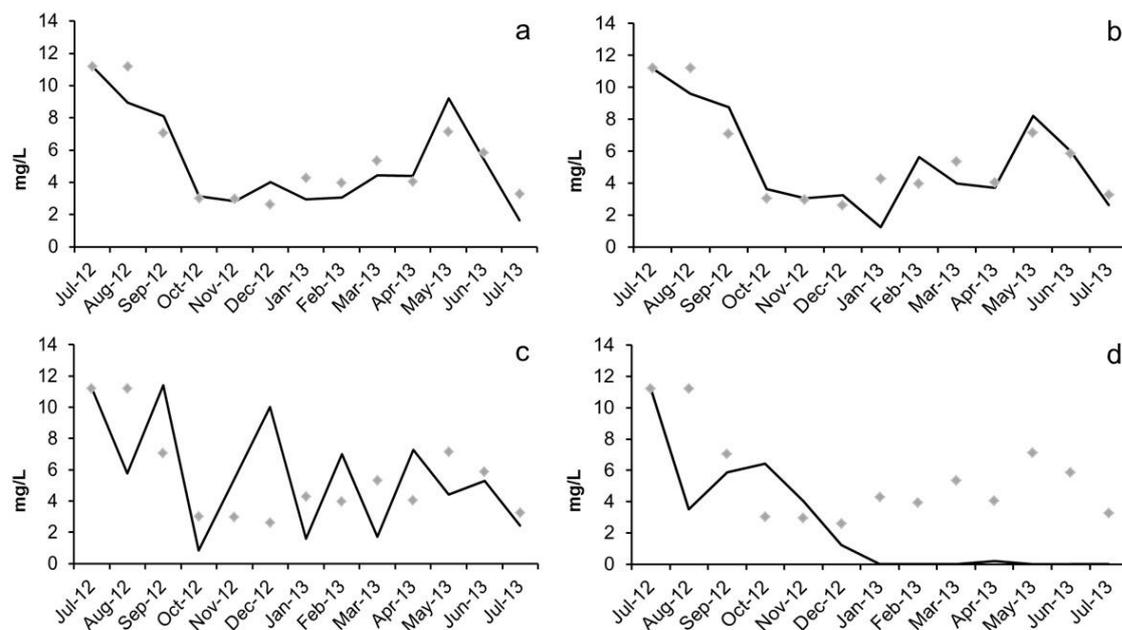


Fig. 6: Simulações do fitoplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo simultaneamente o PD e o ND: os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e a linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

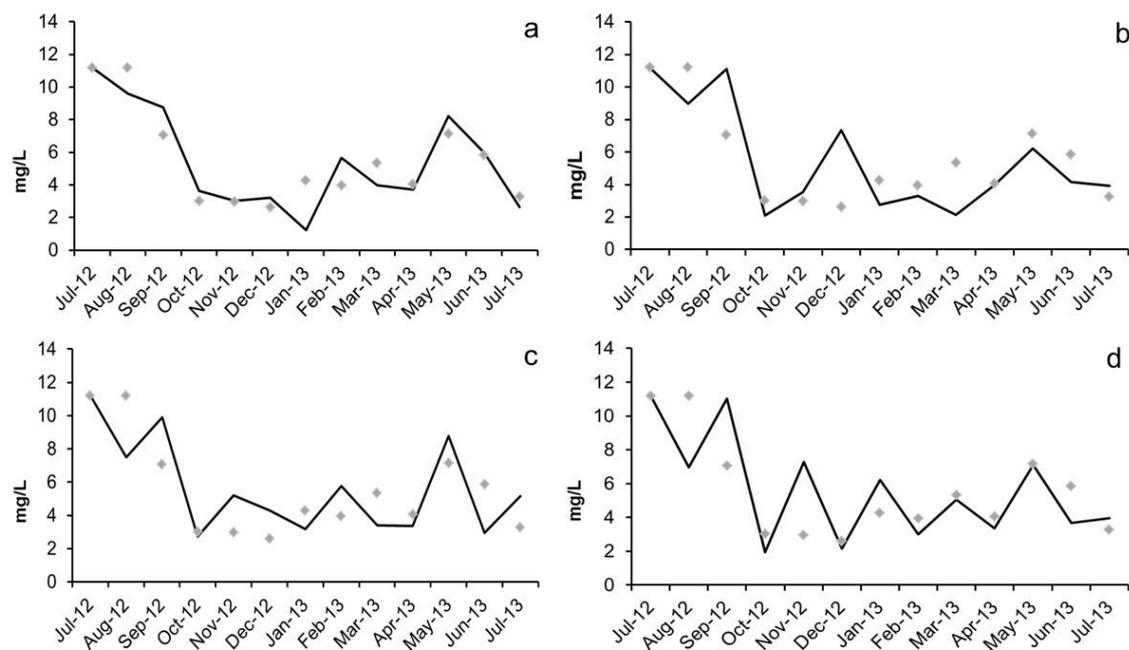


Fig. 7: Simulações do fitoplâncton com aumento e redução da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito do aumento de temperatura e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 2.0  $^{\circ}\text{C}$ , b) aumento de 4.0  $^{\circ}\text{C}$ , c) redução de 2.0  $^{\circ}\text{C}$  e d) redução de 4.0  $^{\circ}\text{C}$ .

As simulações de aumento de zooplâncton resultaram em respostas negativas por parte do fitoplâncton, com maior expressividade no aumento em 90% (Fig.8a, 8b e 8c). A simulação de redução de 20% resultou em resposta positiva e bastante representativa por parte do fitoplâncton (Fig. 8d).

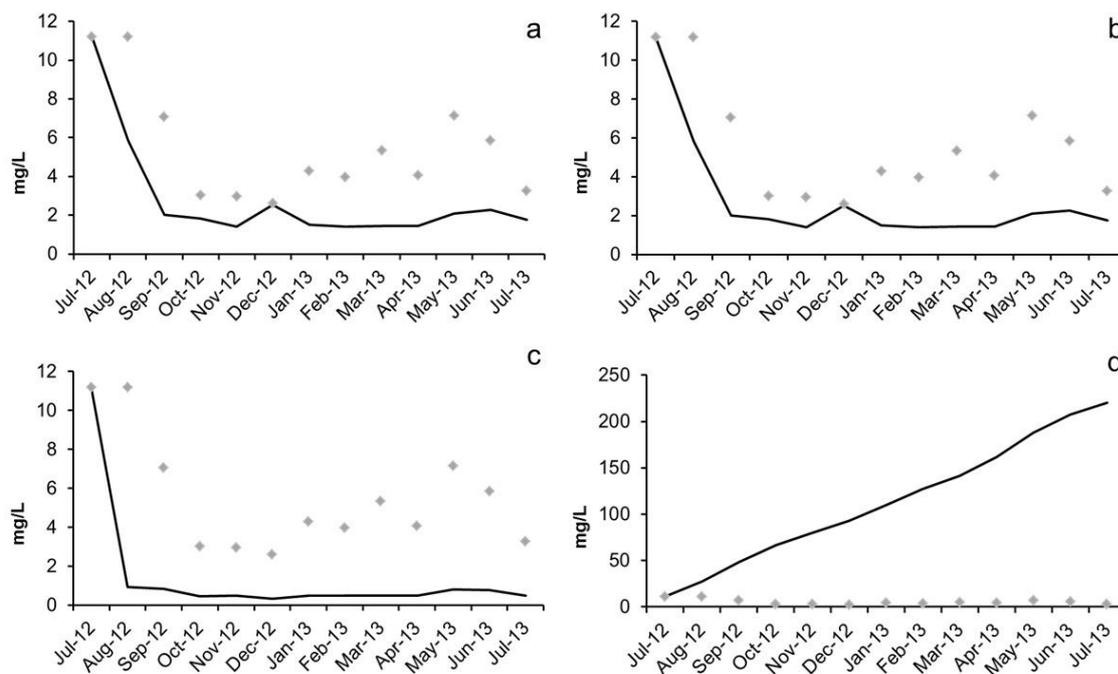


Fig. 8: Simulações do fitoplâncton com aumento e redução do zooplâncton. Os pontos representam o fitoplâncton sem o efeito do aumento do zooplâncton e as linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 20%, b) aumento de 50%, c) aumento de 90% e d) redução de 20%, que alterou a escala do eixo de concentração fitoplanctônica.

As simulações de aumento de nutrientes resultaram em respostas positivas no zooplâncton (Fig. 9a e 9b), sendo o aumento de 100% (Fig. 9b) o mais expressivo. As simulações de redução de nutrientes resultaram em respostas negativas no zooplâncton (Fig. 9c e 9d), sendo a redução de 90% (Fig. 9d) a mais expressiva.

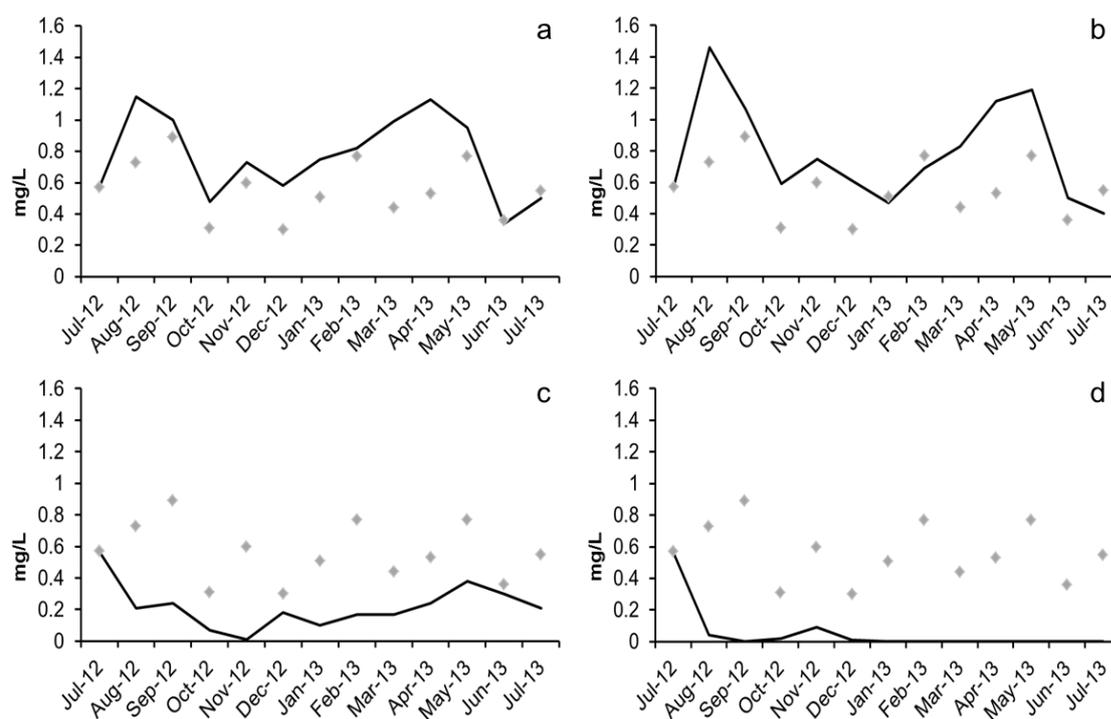


Fig. 9: Simulações do zooplâncton no modelo EXTREMOZ aumentando e reduzindo simultaneamente o PD e o ND: os pontos representam o zooplâncton sem o efeito das alterações nas concentrações de nutrientes e a linhas sólidas representam as simulações: a) aumento de 50%, b) aumento de 100%, c) redução de 50% e d) redução de 90%.

### 3.3 $p\text{CO}_2$

Em 11 de 13 meses amostrados, o ecossistema apresentou valores mais altos de  $p\text{CO}_2$  (na água) que o da atmosfera ( $380 \mu\text{atm}$ ) sugerindo que o ecossistema encontrou-se supersaturado em  $\text{CO}_2$  a maior parte do tempo (Tabela 2). Não foi registrada relação significativa entre Clorofila-a x  $p\text{CO}_2$  (Fig. 10).

Tabela 2: Valores de pCO<sub>2</sub> em  $\mu\text{atm}$  para os meses de coleta na Lagoa de Extremoz (RN).

Mês/Ano	pCO <sub>2</sub> ( $\mu\text{atm}$ )
Julho/2012	3903.15
Agosto/2012	1287.49
Setembro/2012	1547.60
Outubro/2012	442.63
Novembro/2012	2084.68
Dezembro/2012	2694.13
Janeiro/2013	307.20
Fevereiro/2013	6431.63
Março/2013	300.51
Abril/2013	5867.81
Mai/2013	2705.47
Junho/2013	1189.84
Julho/2013	3563.12

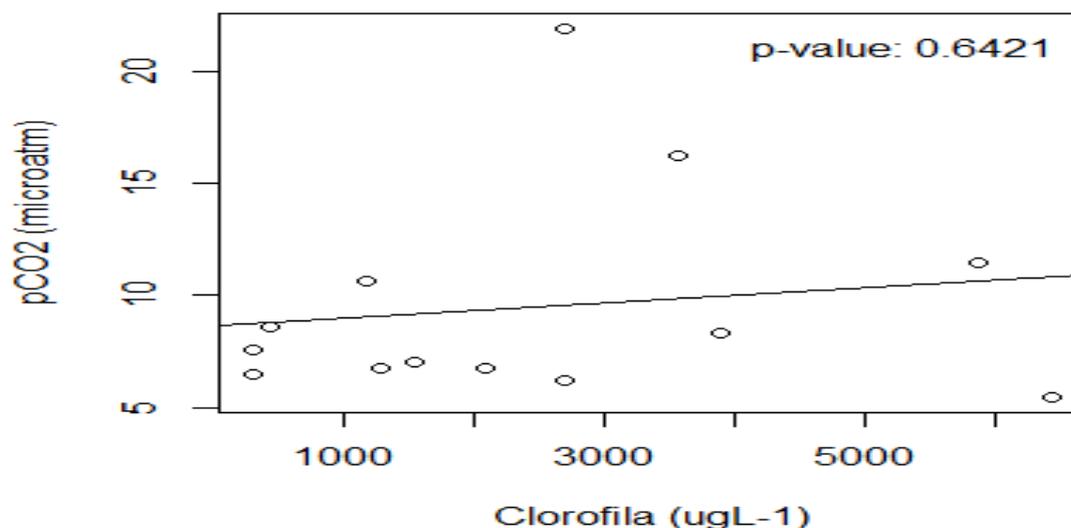


Fig 10: Regressão linear entre pCO<sub>2</sub> e Clorofila-a ( $p > 0.10$ ) para a Lagoa de Extremoz - RN.

## 4 Discussão

### 4.1 Modelo

Os valores dos parâmetros das equações do modelo EXTREMOZ foram calibrados com um conjunto de dados de fito e zooplâncton (Ponto 1) e depois validados para um conjunto independente (Ponto 2). Em ambos os casos, o modelo EXTREMOZ descreveu bem e significativamente as flutuações observadas destas duas variáveis de estado.

Para alcançar esse modelo ajustado foi preciso alterar os valores de algumas constantes. Desta forma, ZooGPhy que é a constante de meia saturação do *grazing* variou entre 0.6 (se Phy era maior que 5.4) e 1 (se Phy era menor ou igual a 5.4). Da mesma forma ZooMGR que é a taxa máxima de *grazing*, variou entre 1.59 (se Phy era menor que 8) e 1.51 (se Phy era maior ou igual a 8). Estas alterações são biologicamente possíveis, desde que a taxa de redução de predação em concentrações elevadas de alimentos seja obtida por uma redução na taxa de movimento dos apêndices torácicos e pela rejeição de alimentos em excesso no canal alimentar do zooplâncton (McMahon & Rigler 1963, McMahon 1968).

## 4.2 Simulações

O bom ajuste do modelo EXTREMOZ permitiu realizar algumas simulações de alteração das variáveis forçantes (nitrogênio, fósforo e temperatura) que indicaram que aumentos nas concentrações de fósforo e nitrogênio, separada ou simultaneamente, não modificaram a biomassa fitoplanctônica rejeitando nossa primeira hipótese. Mesmo quando os valores dos nutrientes são reduzidos em 90% o fitoplâncton, apesar de ser reduzido, consegue se manter. Isto pode estar ocorrendo, a maior parte do fitoplâncton encontrado na Lagoa de Extremoz é composto pela cianobactéria *Planktolyngbya limnetica* (Pinto, 2013) que tem a capacidade de armazenar nutrientes e se manter mesmo em baixas concentrações de nutrientes na água, indicando que a limitação (simulada) de nutrientes não é capaz de reduzir acentuadamente essa comunidade de imediato.

O carbono (CO<sub>2</sub>) parece não influenciar o fitoplâncton como em Talling (1976) e , Riebessel et al. (1993). Também refutando a hipótese 4.

Essa falta de sensibilidade do fitoplâncton às variações das concentrações de nutrientes pode indicar também a ocorrência de uma pirâmide de biomassa invertida, na qual, os produtores primários seriam em menor tamanho e biomassa que os predadores. Em tais casos, embora o fluxo de energia seja mais rápido nos produtores primários do que nos consumidores, o rápido metabolismo e renovação dos produtores realizam uma maior produção com uma menor biomassa permanente (Odum, 2004).

A hipótese 2 de que a temperatura influencia no crescimento fitoplanctônico (Thies et al., 2012), não foi corroborada pelas simulações, pois, apesar de serem detectadas algumas modificações nos valores originais simulados (Fig. 7d, por exemplo) estas alterações ainda parecem concordar com os valores observados.

Como na Lagoa de Extremoz o zooplâncton apresentou diversas alterações em função das alterações nos nutrientes, há um indicativo que ao aumento de nutrientes seguiria rapidamente um aumento de fitoplâncton, que seria consumido imediatamente pelo zooplâncton, encobrendo a resposta direta do fitoplâncton ao aumento das concentrações de nutrientes. Como as amostragens aqui realizadas foram mensais esta explicação não pode ser totalmente descartada (hipótese 4).

Embora os calanoidas sejam tidos como filtradores de fitoplâncton, muitos trabalhos têm relatado sua onivoria e a sua capacidade de selecionar alimento (Dam and Lopes, 2003, Camacho, 2012). Assim, ciliados e dinoflagelados podem compor de 25 a 98% da dieta de copépodos Calanoida (Schnetzer, 2005). Considerando que copépodos são capazes de predação de protozoários (Merrell and Stoecker, 1998, Hansen, 2000, Dam and Lopes, 2003, Gismervik, 2006, Saage et al., 2009) e protozoários são capazes de predação de pequenas cianobactérias (Dryden and Wright, 1987), a explicação de que os protozoários (não modelados aqui) são intermediários na passagem de biomassa para níveis tróficos superiores parece ser razoável.

Tal fato indica que essa predação intermediária (protozoários sobre fitoplâncton) pode estar controlando diretamente a biomassa fitoplanctônica e, portanto, encobrindo uma possível resposta direta do fitoplâncton ao aumento das concentrações de nutrientes (assim como já explicado acima em relação ao zooplâncton). Porém, como só foram modelados fitoplâncton e zooplâncton, não é possível afirmar a força dessa interação.

Além disso, para o modelo EXTREMOZ, modificações nos valores de temperatura resultaram em mudanças insignificantes nos valores de fitoplâncton (hipótese 2 refutada), isto pode estar acontecendo pois a temperatura da água da Lagoa de Extremoz ( $\pm 29,4$  °C) já é alta o suficiente e somente seu incremento não influenciará mais num incremento de biomassa fitoplanctônica, que depende de outros fatores em conjunto (intensidade luminosa, por exemplo) para que a temperatura possa influenciar no fitoplâncton (Winder et al., 2012).

O modelo EXTREMOZ parece concordar com a hipótese 3, isto é, alterações nos valores de zooplâncton resultaram em mudanças inversamente proporcionais no fitoplâncton. Sabe-se que cianobactérias (a maior parte do fitoplâncton aqui encontrado) são normalmente rejeitadas como alimento pelo zooplâncton (Burns, 1968, Webster and Peters, 1978, Porter and Orcutt, 1980) ou são predadas em baixas taxas (Tezuka, 1971, Crowley, 1973, Infante, 1973, Geller, 1975, Lampert, 1981; Ali Ger *com. pessoa*). Porém, se a cianobactéria for de pequeno porte ( $<30$   $\mu\text{m}$ ), os calanoidas podem ingerir cianobactérias em altas taxas (Kozlowsky-Suzuki et al., 2003, Panosso et al., 2003), podendo a cianobactéria ser considerada a maior fonte de alimento para os calanoidas (Moriarty et al., 1973, Vareschi and Jacobs, 1984, Burns et al., 1989). No

caso da Lagoa de Extremoz, o fitoplâncton é dominado pela cianobactéria *P. limnetica* que é de pequeno porte (1,6 e 2,8  $\mu\text{m}$ ; Cordeiro-Araújo et al., 2010). Assim sendo, essa cianobactéria parece estar servindo de alimento ao zooplâncton que é composto em sua maioria (90%) por copépodos da ordem Calanoida. Portanto, o modelo mostra que o crescimento fitoplanctônico da Lagoa de Extremoz esta sendo controlado pelo zooplâncton, evidenciando um mecanismo top-down de controle.

## **5 Conclusão**

A predação direta do zooplâncton sobre a cianobactéria de pequeno porte que perfaz a maior parte do fitoplâncton observado parece factível, isto é, o fitoplâncton da Lagoa de Extremoz estaria sendo controlado por um efeito top-down.

## 6 Referências

- APHA (American Public Health Association). 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. 1325 p.
- ANGELINI R. PETRERE MJR. 2000. A model for the plankton system of the Broa reservoir, São Carlos, Brazil. *Ecol Model* 126. 131–137.
- ARHONDITSIS GB, BRETT MT. 2005. Eutrophication model for lake Washington (USA): part II—Model calibration and system dynamics analysis. *Ecol Model* 187:179–200.
- ATP (Assessoria Técnica e de Planejamento). 2006. Plano diretor de resíduos sólidos do pólo de turismo Costa das Dunas: Produto 1.1 – Diagnóstico dos resíduos sólidos. Secretaria do estado do Rio Grande do Norte de educação e cultura, Natal.
- BERGQUIST AM AND CARPENTER SR. 1986. Limnetic Herbivory: Effects on phytoplankton populations and primary production. *Ecology* 67:5:1351-1360.
- BERKES F AND SEIXAS CS. 2005. Building resilience in lagoon social-ecological systems: a local level perspective. *Ecosystems* 8:8:967-974.
- BOWIE GL, MILLS WB, PORCELLA DB, CAMPBELL CL, PAGENKOPF JR, RUPP GL, JOHNSON KM, CHAN PWH, GHERINI SA. 1985. Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling. Second edition. EPA 600-3-85-040. 455 p.
- BURNS CW. 1968. Direct observation of mechanisms regulating feeding behavior of daphnia in lake Water. *Int Rev Gesamten Hydrobiol* 53: 83–100.
- BURNS CW, FORSYTH DJ, HANEY JF, LAMPERT W AND PRIDMORE RD. 1989. Coexistence and exclusion of zooplankton by *anabaena minutissima* var. *attenuata* in lake Rotongaio, New Zealand. *Arch Hydrobiol Ergebn Limnol* 32: 63–82.
- CAERN. 2012. Relatório anual 2012 – Qualidade da água. Natal/RN – Zona norte.
- CAMACHO FR. 2012. O elo microbiano como alimento alternativo para o zooplâncton em reservatórios dominados por cianobactérias. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de biociências. Programa de Pós-graduação em ecologia. 37 p.
- CARMOUZE JP. 1994. O metabolismo dos ecossistemas aquáticos. Edgard Blücher/SBL/FAPESP. São Paulo. 254 p.
- CARPENTER SR, KITCHELL JF AND HODGSON JR. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *BioScience* 35:10:634-639.

CARPENTER SR, KITCHELL JF, HODGSON JR, COCHRAN PA, ELSER JJ, ELSER MM, LODGE DM AND KRETCHMER DHE. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology* 68:6:1863-1876. CARPENTER SR,

CHAO X, YAFEI J AND COOPER CM. 2006. Development and application of a phosphorus model for a shallow Oxbow Lake. *J Environ Eng* 132:1498-1507.

CHOI JS. 1998. Lake ecosystem responses to rapid climate change. *Environ Monit Assess* 49:281-290.

CORDEIRO-ARAÚJO MK, OGAVA LE, MOURA AN, PICCIN-SANTOS V AND BITTENCOURT-OLIVEIRA MC. 2010. Cianobactérias planctônicas de reservatórios do oeste paulista, Brasil: Condições naturais *versus* controladas. *Rev Bras Eng Pesca* 5:74-88.

CROWLEY PH. 1973. Filtering Rate inhibition of daphnia pulex in Wintergreen lake. *Limnol Oceanogr* 18:394-402.

DAM HG AND LOPES RM. 2003. Omnivory in the calanoid copepod temora longicornis: Feeding, egg production and egg hatching rates. *J Exp Mar Biol Ecol* 292:119-137.

DEGANS H AND DE MEESTER L. 2002. Top-down control of natural phyto- and bacterioplankton prey communities by daphnia magna and by the natural zooplankton community of the hypertrophic Lake Blankaart. *Hydrobiol* 479:39-49.

DRYDEN RC AND WRIGHT SJL. 1987. Predation of cyanobacteria by protozoa. *Can J Microbiol* 33:471-482.

DUVOISIN, I A. 2000. Uma proposta metodológica para o ensino de equações diferenciais utilizando STELLA. *Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*. Porto Alegre, v.4.

ELSER JJ, GOLDMAN CR. Zooplankton effects on phytoplankton in lakes of contrasting trophic status. 1991. *Limnol Oceanogr* 36:l:64-90.

ESTEVES FA, CALIMAN A, SANTANGELO JM, GUARIENTO RD, FARJALLA VF AND BOZELLI RL. 2008. Neotropical coastal lagoons: An appraisal of their biodiversity, functioning, threats and conservation management. *Braz J Biol* 68:4:967-981.

FERRACIOLI, L. AND CAMILETTI, G G. 1998. Introdução ao ambiente de modelagem computacional STELLA. Vitória: Model@b/UFES, 1988. Série Modelos 01/98

FRAGOSO JR, FERREIRA CR AND MOTTA MARQUES T.F. 2009. Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos. *Oficina de Textos*. 304 pp.

GELLER W. 1975. Die nahrungsaufnahme von daphnia pulex in abh angigkeit von der futterkonzentration, der temperature, der korpergrosse und dem hungerzustand der tiere. Arch. Hydrobiol. 48:47-107.

GISMERVIK I. 2006. Top-down impact by copepods on ciliate numbers and persistence depends on copepod and ciliate species composition. J Plankton Res 28:499-507.

GOLTERMAN HL, CLIMO RS AND OHNSTAD MAM. 1978. methods for physical and chemical analysis of freshwaters. I.BP. Handbooks n.8. Blackwell scientific publications. Oxford. 213 p.

GRIFFIN SL AND RIPPINGALE RJ. 2001. Zooplankton grazing dynamics: Top-down control of phytoplankton and its relationship to an estuarine habitat. Hydrol. Process. 15:2453–2464.

HAIRSTON NG, SMITH FE AND SLOBODKIN LB. 1960. Community structure, population control, and competition. Am Nat 94:879:421-425.

HAMMERSLEY JM AND HANDSCOMB DC. 1964. Monte Carlo methods. Editora Wiley. New Jersey. United States. 300 p.

HANSEN AM. 2000. Response of ciliates and cryptomonas to the spring cohort of a cyclopid copepod in a shallow hypereutrophic lake. J Plankton Res 22:185-203.

HENNERMAN MC AND PETRUCIO MM. 2010. Seasonal phytoplankton response to increased temperature and phosphorus inputs in a freshwater coastal lagoon, southern Brazil: a microcosm bioassay. Acta Limno Bras 22: 295-305.

HEIN M. 1997. Inorganic carbon limitation of photosynthesis in lake phytoplankton. Freshw Biol 37:3:545-552.

HEISLER J, GLIBERT PM, BURKHOLDER JM. ANDERSON DM AND COCHLAN W. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus. Harm Alg 8:3–13.

HILLEBRAND H, DURSELEN CD, KIRSCHTEL D, POLLINGHER U AND ZOHARY T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. J of Phycol 35:403-424

HOWARTH RW. 2002. Nutrient Over-Enrichment of Coastal Waters in the United States: Steps toward a Solution. Pew Oceans Commission

HUANG YL, HUANG GH, LIU DF, ZHU H AND SUN W. 2012. Simulation-based inexact chance-constrained nonlinear programming for eutrophication management in the Xiangxi Bay of three gorges reservoir. J Environ Manage 108:54-65.

INFANTE AG. 1973. Untersuchungen liber die ausnutzbarkeit verschiedener algen durch das zooplankton. Arch Hydrobiol 42:340-405.

JEPPESEN E, KRISTENSEN P, JENSEN JP, SONDERGAARD M, MORTENSEN E AND LAURIDSEN T. 1991. Recovery resilience following a reduction in external phosphorus loading of shallow, eutrophic danish lakes: duration, regulating factors and methods for overcoming resilience. *Mem Ist Ital Idrobiol* 48:27–148.

JEPPESEN E, JENSEN J P, SØNDERGAARD M, LAURIDSEN T L, LANDKILDEHUS F. 2000a. Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwat Biol* 45:201–13.

JEPPESEN E, JENSEN J P, SØNDERGAARD M. 2002a. Response of phytoplankton, zooplankton and fish to re-oligotrophication: an 91-year study of 23 Danish lakes. *Aquat Ecosys Health Manage* 5:31–43.

JEPPESEN E, SØNDERGAARD M A, SØNDERGAARD M O, CHRISTOFFERSEN K, JÜRGENS K, THEIL-NIELSEN J, SCHLÜTER L. 2002b. Cascading trophic interactions in the littoral zone: an enclosure experiment in shallow Lake Stigsholm, Denmark. *ArchHydrobiol* 153:533–555.

JORGENSEN S E. 1979. Handbook of environmental data and ecological parameters. International society for ecological modeling. Denmark. 1162 p.

KOZLOWSKY-SUZUKI B, KARJALAINEN M, LEHTINIEMI M, ENGSTRÖM-ÖST J, KOSKI M AND CARLSSON P. 2003. Feeding, reproduction and toxin accumulation by the copepods *acartia bifilosa* and *eurytemora affinis* in the presence of the toxic cyanobacterium *nodularia spumigena*. *Mar Ecol Prog Ser* 249:237–249.

KOTTEK M, GRIESER J, BECK C, RUDOLF B AND RUBEL F. 2006. World map of the köppen-geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 15: 259-263.

LAMPERT W. 1981. toxicity of the bluegreen *microcystis aeruginosa*: Effective defence mechanism against daphnia. *Verh Int Verein Limnol* 21:1436-1440.

LOW EW, CLEWS E, TODD PA, TAI YC AND PETER KLNG. 2010. Top-down control of phytoplankton by zooplankton in tropical reservoirs in Singapore? *Raf Bul Zool* 58:311–322.

LUDWIG D AND BROCK WA. 1999. management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecol Appl* 9: 751–771.

LLUS E AND KESKITALO J. 2008. The response of phytoplankton to increase temperature in the Loviisa Archipelago, Gulf of Finland. *Bor Environ Res* 13:503-516.

MALECKI LM, WHITE JR AND REDDY KR. 2004. Nitrogen and phosphorus flux rates from sediment in the lower St. John river estuary. *J Environ Qual* 33.

MCCMAHON JW. 1968. Environmental factors influencing the feeding behaviour of *daphnia magna straus*. *Can J Zool* 46:759-762.

MCMAHON JW AND RIGLER FH. 1963. mechanisms regulating the feeding rate of *daphnia magna straus*. Can J Zoo. 41:321-332.

MERRELL JR AND STOECKER DK. 1998. Differential grazing on protozoan microplankton by developmental stages of the calanoid copepod *eurytemora affinis poppe*. J Plankton Res 20:289-304.

MONOD J. 1942. Recherches sur la croissance des cultures bacteriennes. Herman et Cie, Paris. 210 P.

MORIARTY DJW, DARLINGTON JPE, DUNN IG, MORIARTY CM AND TEVLIN MP. 1973. Feeding and grazing in lake George, Uganda. Proc R Soc London Ser B 184:299-319.

MOSS B, MCKEE D, ATKINSON D, COLLINGS SE, EATON JW, GILL AB, HARVEY I, HATTON K, HEYES T AND WILSON D. 2003. How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. J App Ecol 40:5:782-792.

MURPHY J AND RILEY JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta 27:31-36.

MUYLAERT K, DECLERCK S, WICHELEN JV, DE MEESTER L AND VYVERMAN W. An evaluation of the role of daphnids in controlling phytoplankton biomass in clear water versus turbid shallow lakes. Limnologia, 36:69-78.

ODUM EP. Fundamentos de ecologia. 2004. 6° edição. Fundação Calouste Gulbenkian. 927 p.

PANOSSO R. 2003. Effect of grazing by a neotropical copepod, *notodiaptomus*, on a natural cyanobacterial assemblage and on toxic and non-toxic cyanobacterial strains. J Plankton Res 25:1169-1175.

PAERL HW, XU H, MCCARTHY MJ, ZHU GW AND QIN BQ. 2011. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy. Water Res 45: 1973-1983.

PINTO TS. 2013. Dinâmica nictemeral dos grupos funcionais fitoplanctônicos de um manancial tropical, Lagoa de Extremoz, nordeste do Brasil. Monografia. UFRN. 22.

PORTER KG AND ORCUTT JD. 1980. Nutritional adequacy manageability and toxicity as factors that determine the food quality of green and bluegreen algae for daphnia. American Society of Limnology and Oceanography Special Symposium 3:268-281.

RABALAIS, N N. 2002. Nitrogen in aquatic ecosystems. Ambio 31: 2: 102-112.

REDDY KR, FISHER MM, WANG Y, WHITE JR AND JAMES TA. 2007. Potential effects of sediment dredging on internal phosphorus loading in a shallow, subtropical lake. *Lake Reserv Manage* 23:27–38.

RICHMOND, B. An academic user's guide to STELLA. 1907 Lime: High Performance System, Inc.

RIEBESSEL U, WOLF-GLADROW DA AND SMETACEK V. 1993. carbon dioxide limitation of marine phytoplankton growth rates. *Nature* 361:249 – 251.

SAAGE A, VADSTEIN O AND SOMMER U. 2009. Feeding behaviour of adult centropages hamatus (copepoda, calanoida): functional response and selective feeding experiments. *J Sea Res* 62:16-21.

SCHNETZER A. 2005. Copepod grazing impact on the trophic structure of the microbial assemblage of the San Pedro channel, California. *J Plankton Res* 27: 959-971.

SCHINDLER, D W. 1980. The effect of fertilization with phosphorus and nitrogen versus phosphorus alone on eutrophication of experimental lakes. *Limnol Oceanogr* 25: 6: 1149-1152.

SCHIPPERS P, LÜRLING M AND SCHEFFER M. 2004. Increase of atmospheric CO<sub>2</sub> promotes phytoplankton productivity. *Ecol Lett* 7:446-451.

SMITH VH. 2003. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems: a global problem. *Environ Sci Pollut Res Int* 10:126–139.

SMITH VH AND SCHINDLER DW. 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *trends in ecology and evolution* 24:201–207.

SOLIDORO C, PASTRES R AND COSSARINI G. 2005. Nitrogen and plankton dynamics in the lagoon of Venice. *Ecol Model* 184:103–124.

TALLING JF. 1976. The depletion of carbon dioxide from lake water by phytoplankton. *J Ecol* 64:79-121.

TERTRA TECH INC. 1980. Methodology for evaluation of multiple power plant cooling system effects, volume V. Methodology application to prototype – Cayuga Lake. Tetra Tech, Inc., Lafayette, California. For Electric Power Research Institute. Report EPRI EA-1111.

TEZUKA Y. 1971. Feeding of daphnia on planktonic bacteria. *Jpn J Ecol* 21: 127-134.

TILMAN D, KILHAM SS AND KILHAM P. 1982. Phytoplankton community ecology: The role of limiting nutrients. *Annual Review of Ecology. Evol Systems* 13:349-72.

THIES H, TOLOTTI M, NICKUS U, LAMI A, MUSAZZI S, GUILIZZONI P, ROSE NL AND YANG H. 2012. Interactions of temperature and nutrient changes: effects on phytoplankton in the Piburger See (Tyrol, Austria). *Freshw Biol* 57: 2057-2075.

TURNER EL, BRUESEWITZB DA, MOONEYB RF, MONTAGNAA PA, MCCLELLANDB JW, SADOVSKIA A AND BUSKEYBAHARTE EJ. 2014. Comparing performance of five nutrient phytoplankton zooplankton (NPZ) models in coastal lagoons. *Ecol Model* 277:13–26.

UTERMÖHL H. 1958. Zur vervollkommung der quantitativen phytoplankton - methodik. *Mitteilungen der internationale Vereinigung für. Theoretische und Angewandte Limnologie* 9: 1-38.

VARESCHI AND JACOBS J. 1984. The ecology of lake Nakuru (Kenya). production of consumer organisms. *Oecologia* 61:83–98.

WEBSTER KW AND PETERS RH. 1978. Some Size dependent inhibitions of larger cladoceran filterers in filamentous suspension. *Limnol Oceanogr* 23:1238-1245.

WETZEL R G AND LIKENS G E. 1991. *Limnological analyses*. Springer-Verlag, NY. 429p.

WETZEL R G. 1983. *Limnology*, 2<sup>nd</sup> Ed. Saunders college publishing, Philadelphia, PA. 860 p.

WETZEL R G. 2001. *Limnology: Lake and river ecosystems*, 3<sup>rd</sup> ed. Academic Press, San Diego. 1006 p.

WINDER M, BERGER SA, LEWANDOWSKA A, ABERLE A, LENGFELLNER K, SOMMER U. AND DIEHL S. 2012. Spring phenological responses of marine and freshwater plankton to changing temperature and light conditions. *Mar Biol* 159:2491-2501.

## 7 Anexo

**Tabela A1:** Siglas e significados de constantes e parâmetros das equações que compõem o modelo Extremoz.

Abreviaturas	Significado	Fórmula	Valor da literatura	Referência
Phy(t)	Fitoplâncton	$Phy(t - dt) + (GrowthPhy - Gzoo - NMPhy - spHY - RespPhy) \times dt$		
Zoo(t)	Zooplâncton	$Zoo(t - dt) + (Gzoo - MORTzoo - EXCZoo - RespZoo) \times dt$		
ZooOBVP1	Zooplâncton observado no ponto 1			
FitoOBVP1	Fitoplâncton observado no ponto 1			
NDOBVP1	Nitrogênio dissolvido observado no ponto 1			
PDOBVP1	Fósforo dissolvido observado no ponto 1			
profOBVP1	Profundidade observada no ponto 1			
tempOBVP1	Temperatura observada no ponto 1			
Solar_Radiation_kcal_OBV	Radiação solar observada			
ZooMGR	Taxa máxima de grazing para copépodos	IF FitoOBVP1 < 8 THEN 1.59 ELSE 1.512	1.6	Scavia, 1980
ZooGPhy	Constante de meia saturação para formulação do grazing para copépodos	IF FitoOBVP1 > 5.4 THEN 1 ELSE 0.6	1	Bowie et al., 1980
Grazz	Predação	$ZooMGR \times (Phy / (ZooGPhy + Phy)) \times Zoo$		Bowie et al., 1982
Ez	Eficiência de assimilação para copépodos		0.7	Canale, 1976
Gphy	Valor ajustado para a taxa máxima de crescimento		0.5	Angelini and Petrere, 2000
Gmax	Crescimento máximo do fitoplâncton	$Gphy \times (EXP(0.1 \times tempOBVP1))$	$Gphy \times (EXP(0.06933 \times tempOBVP1))$	Kremer and Nixon, 1978
MMnd	Equação de Monod para nitrogênio dissolvido	$NDOBVP1 / (0.9 + NDOBVP1)$	$NDOBVP1 / (0.5 + NDOBVP1)$	Angelini and Petrere, 2000
MMpd	Equação de Monod para fósforo dissolvido	IF PDOBVP1 < 0.003 THEN PDOBVP1 / (0.0001 + PDOBVP1) ELSE PDOBVP1 / (0.003 + PDOBVP1)	$PDOBVP1 / (0.2 + PDOBVP1)$	Angelini and Petrere, 2000
MMsr	Equação de Monod para radiação solar	$Solar\_Radiation\_kcal\_OBV / (4519 + Solar\_Radiation\_kcal\_OBV)$		Angelini and Petrere, 2000
GrowthPhy	Crescimento do fitoplâncton	$(Gmax \times (MMnd \times MMpd \times MMsr))$		Angelini and Petrere, 2000
Gzoo	Crescimento do zooplâncton	$Grazz \times Ez$		Angelini and Petrere, 2000
NMTref	Mortalidade não predatória em temperatura referência (20 C)		0.02	Jorgensen, 1976
Tref	Temperatura de referência		20	Bowie, 1985
FrT	Função da temperatura para a respiração e mortalidade não predatória do fitoplâncton	$tempOBVP1 / Tref$		Bowie, 1985
NMPhy	Mortalidade não predatória para fitoplâncton	$NMTref \times FrT$		Bowie, 1985
VsTref	Velocidade de sedimentação do fito na temperatura de referencia (20 C)		0.05	Canale, 1976
FsT	Função da temperatura para a velocidade de	$(157.5) / (((0.69) \times ((tempOBVP1^2) -$		Tetra tech, 1980

spHY	sedimentação Sedimentação do fitoplâncton	$(5.3 \times \text{tempOBVP1}) + (177.6))$ $(VsTref / \text{profOBVP1}) \times FsT$		Bowie, 1985
rphyTref	Taxa de Respiração do fitoplâncton em temperatura de referência (20 C)		0.05	Jorgensen, 1979
RespPhy	Respiração do fitoplâncton	rphyTrefxFrT		Bowie, 1985
MORTzoo	Mortalidade do Zooplâncton	Zoox0.29	Zoox0.006	Canale, 1976
ZooEXR	Taxa de excreção do Zooplâncton		0.048	Solidoro et al, 2005
TPK	Coefficiente de dependência de temperatura	$0.98^{(\text{tempOBVP1} - 27.1)}$		Solidoro et al, 2005
ExcretZoo	Excreção do Zooplâncton	ZooEXRxTPKxZoo		Solidoro et al, 2005
RespZoo	Respiração do Zooplâncton	0.6xZoo	0.06xZoo	Angelini and Petrere, 2000

