



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

Raphael Monteiro Cavalcanti

**APLICAÇÃO DO MODELO IPH-ECO NA SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA
CLOROFILA-A EM LAGOA COSTEIRA DO RN**

**Natal
(2016)**

Raphael Monteiro Cavalcanti

**APLICAÇÃO DO MODELO IPH-ECO NA SIMULAÇÃO DA DINÂMICA
DA CLOROFILA-A EM LAGOA COSTEIRA DO RN**

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
2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas Biblioteca Central Zila
Mamede / Setor de Informação e Referência

Cavalcanti, Raphael Monteiro.

Aplicação do modelo IPH-ECO na simulação da dinâmica da Clorofila-a em lagoa costeira do RN / Raphael Monteiro Cavalcanti. - Natal, RN, 2016.

28 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Angelini.

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

1. Eutrofização - Dissertação. 2. Modelagem ecológica - Dissertação. 3. Clorofila-a - Dissertação. I. Angelini, Ronaldo. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 556.18(813.2)

RAPHAEL MONTEIRO CAVALCANTI

**APLICAÇÃO DO MODELO IPH-ECO NA SIMULAÇÃO DA DINÂMICA
DA CLOROFILA-A EM LAGOA COSTEIRA DO RN**

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

Dra. Fabiana de Oliveira Araújo Silva - Examinador Interno

Dr. Rodrigo Silva da Costa – Examinador Externo

Natal, 05 de julho de 2016

Agradecimentos

Agradeço a Deus, acima de tudo, por conhecê-lo e experimentá-lo em minha vida. Pelo cuidado em toda a minha jornada e pela imensa benção de fazer parte da comunidade científica e poder colaborar com a construção do conhecimento.

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado que propiciou a continuidade dos meus estudos durante esses dois anos.

Agradeço ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária da UFRN, juntamente com o corpo docente, discente e demais funcionários que o compõe pelo apoio e paciência.

Em especial ao Prof. Dr. Ronaldo Angelini pelo incentivo, encorajamento e apoio, sem os quais, sem sombra de dúvidas, não teria chegado até aqui. Obrigado pela paciência e disponibilidade.

Aos professores do Mestrado em Engenharia Sanitária, pelo incentivo ao aprendizado e pesquisa e por serem modelos profissionais para nós.

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

Ao Prof. Dr. Ruberto Fragoso por sua solicitude em cooperar com o andamento do trabalho.

A J. Rafael Cavalcanti pelas inúmeras reuniões via Skype para nos auxiliar em praticamente todas as fases concernentes ao software.

As todos os meus amigos, em especial a Renan, André, Marina e Arianne, por não terem me deixado desistir e por terem me acompanhado nos momentos difíceis.

À minha noiva, Ana Luísa Ramalho, pela compreensão e apoio incondicionais durante toda essa jornada.

À minha querida irmã Fernanda que vibrou comigo em cada etapa e continuou a me incentivar a chegar até o final.

Finalmente agradeço aos meus pais que sempre investiram em mim, não apenas financeiramente, mas em incentivo, afeto e carinho. Sem vocês nunca conseguiria ter chegado até aqui.

Resumo

A investigação da dinâmica temporal do fitoplâncton em corpos d'água é uma necessidade real e crescente diante dos problemas envolvendo processos de eutrofização decorrente de impactos humanos. Dada a complexidade dos fenômenos envolvendo o crescimento fitoplanctônico, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos em softwares que simulem as estruturas e processos relacionados a este crescimento. Neste trabalho, utilizamos o modelo IPH-ECO (versão 0-D), software que integra os processos hidrodinâmicos, de qualidade da água (limnologia) e de biologia das espécies aquáticas. O ambiente estudado foi a lagoa costeira de Extremoz que abastece a capital Natal (RN), durante o período de 07/2012 a 08/2013. Depois da calibração do modelo, utilizando a dinâmica da clorofila-a como variável resposta, foram simulados vários cenários alterando individualmente as variáveis forçantes: chuva, evaporação, vento, radiação solar e temperatura. Os resultados mostram que a versão 0-D do modelo IPHECO é insensível as alterações das variações climáticas, impedindo com que esta versão seja usada em simulações de poluição ou ainda para o manejo do lago.

Palavras-chave: Eutrofização; Modelagem ecológica; clorofila-a; mudanças climáticas

Abstract

The investigation of temporal dynamics of phytoplankton in water bodies is a growing need because of problems involving eutrophication processes due to human impacts. Given the complexity of the phenomena involving phytoplankton growth, it is necessary, the use of mathematical models to simulate related processes and structures involved in phytoplankton's growth. In this study, we used the IPH-ECO model (0-D version) software that integrates the hydrodynamic processes, water quality (limnology) and biology of aquatic species. Extremoz coastal lagoon was studied because this environment supplies the city of Natal (RN) during the period from 07/2012 to 08/2013. After model calibration, using the dynamics of chlorophyll-a as the response variable, we simulated various scenarios individually changing the forcing variables: rain, evaporation, wind, solar radiation and temperature. The results show that the 0-D version of the model IPH-ECO is insensitive to climatic variations, preventing this version to be used in simulations of pollution or for the management of the lagoon.

Key words: Eutrophication; Ecological modeling; chlorophyll-a; climate change

Lista de Figuras

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

Figura 2: Ajuste do modelo IPHECO às variáveis de entrada temperatura (a) e radiação solar (b). Pontos: valores observados para a Lagoa de Extremoz, P1 (entre 01/07/2012 e 09/08/2013).

Figura 3: Dois ajustes do modelo IPHECO aos valores observados de clorofila-a para a Lagoa de Extremoz (RN): a: ajuste variando apenas os parâmetros referentes a respiração e sedimentação; b: ajuste variando também a taxa de mortalidade.

Figura 4: Alterações nos valores das variáveis de entrada no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: alteração na evaporação, b: clorofila-a alterando a evaporação; c: alteração na chuva, d: clorofila-a alterando a chuva; e: alteração no vento; f: clorofila-a alterando o vento.

Figura 5: Alterações nos valores da variável temperatura no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: simulações de aumento, b: resposta da clorofila-a aos aumentos; c: simulações de redução, d: resposta da clorofila-a as reduções.

Figura 6: Alterações nos valores da variável radiação no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: simulações de aumento, b: resposta da clorofila-a aos aumentos; c: simulações de redução, d: resposta da clorofila-a as reduções.

Figura 7: Resultados das simulações de clorofila-a pelo IPHECO quando se altera conjuntamente as variáveis temperatura e radiação solar; a: temperatura mínima (24,7°C) e a radiação máxima (261,15 W/m²) durante toda a simulação; b: temperatura máxima (34,2°C) e a radiação mínima (171,15 W/m²) durante toda a simulação.

Sumário

1 Introdução.....	10
2 Materiais e métodos.	11
2.1 Área de estudo.....	11
2.2 Dados.....	12
2.3 Modelagem e calibração.....	12
3 Resultados.....	17
4 Discussão.....	23
5 Referências bibliográficas.....	24

Esta dissertação foi escrita conforme as normas da Revista

Engenharia Sanitária e Ambiental

1809-4457 Engenharia Sanitária e Ambiental (Online) ENGENHARIAS I B1



Modelagem da dinâmica de clorofila-a em lagoa costeira da região Nordeste

Raphael Monteiro CAVALACANTI & Ronaldo ANGELINI

Introdução

Durante as últimas décadas a modelagem de fenômenos e processos ambientais têm sido usada como uma importante ferramenta de manejo dos recursos naturais (ANGELINI & GOMES, 2008), permitindo a previsão frente a cenários de mudanças climáticas e outras ações antrópicas potencialmente danosas ao ambiente (KOZAK *et al.*, 2013).

Modelos matemáticos ambientais podem ser definidos como a totalidade de conexões lógicas, parametrizações formalizadas e fórmulas que, agrupadas permitem o estudo e análise dos ecossistemas sem uma análise experimental (GERTSEV & GERTSEVA, 2004). Assim, depois que o modelo é descrito, formalizado matematicamente e parametrizado ele passa a ser usado para inferir e prever mudanças nas condições que não podem ser realizadas no ecossistema real, como, por exemplo, mudanças climáticas e poluição (SOUZA *et al.*, 2016).

Ferramentas computacionais cada vez mais complexas têm sido desenvolvidas para avaliar quantitativamente os diversos processos que atuam nos corpos d'água, como por exemplo, os impactos hidrodinâmicos na dinâmica da produção primária em lagoas brasileiras (SILVA *et al.*, 2016) e sua distribuição espacial (LOPES, 2015) com o auxílio, inclusive, de imagens de satélite

Os modelos normalmente são usados em situações complexas que envolvam múltiplas variáveis e parâmetros, como no caso da análise de ações antrópicas, como lançamento de esgotos domésticos e industriais, que influenciam diretamente a qualidade de água dos ambientes de água doce (ARHONDITSIS *et al.*, 2004; EDMONDSON, 1972; especialmente no Brasil, onde apenas 55,16% dos municípios brasileiros são atendidos por uma rede coletora de esgotos (IBGE, 2008).

Normalmente o lançamento de esgotos num corpo d'água resulta no fenômeno da eutrofização que é o enriquecimento dos nutrientes (CORRELL, 1996) presentes neste despejo. Os principais nutrientes envolvidos neste processo são fósforo e nitrogênio

principalmente no tocante a lagos de água doce (SMITH, 2003; DOWNING, 1992). Os malefícios da eutrofização são diversos como redução da biodiversidade (MCKINNON; TAYLOR, 2012), redução da capacidade recreativa (CARPENTER *et al.*, 1998) e comprometimento da qualidade para o abastecimento urbano (WHO, 1999), podendo causar grandes prejuízos econômicos (PRETTY *et al.*, 2003).

Modelos também podem ser úteis em avaliar impactos climáticos que são fortes condutores das dinâmicas do fitoplâncton nos ambientes de água doce. Fatores climáticos como temperatura, chuva, precipitação e radiação solar contribuem diretamente para esta alteração (YANG *et al.*, 2008; GONÇALVES *et al.*, 2011; MOSS *et al.*, 2011). Sua compreensão, porém, é de alta complexidade uma vez que os processos, em geral, tem comportamento não-linear que geram incertezas (XIA *et al.*, 2016).

O entendimento das interações químico-físicas em consequência das interações antrópicas em lagoas é essencial para traçar as diretrizes para sua preservação (SMITH, 2003). Para essa finalidade, os modelos matemáticos podem ser úteis para compreender os processos e suas magnitudes e também para prever comportamentos futuros, permitindo a simulação de cenários de desenvolvimento (LEBRETON *et al.*, 1992).

No Brasil, alguns modelos mais robustos que integrem aspectos hidrodinâmicos, de qualidade da água e biológicos, começaram a ser desenvolvidos nos últimos anos e apresentam resultados satisfatórios na compreensão destes processos, como os softwares SISBAHIA (SANTOS *et al.*, 2015; ROLLNIC; MEDEIROS, 2013) e IPH-ECO (SOUZA *et al.*, 2016; FRAGOSO, 2009; FRAGOSO, 2011) confeccionados especialmente para trabalhar com aspectos hidrodinâmicos e limnológicos que envolvam eventos de ações antrópicas ou mudanças climáticas.

O objetivo deste trabalho é testar um dos módulos de um destes softwares (IPH-ECO) na descrição da dinâmica da clorofila-a da Lagoa de Extremoz (RN) e analisar a sensibilidade do modelo frente a alteração das condições climáticas nesta lagoa, que é um importante manancial de abastecimento.

Materiais e Métodos

Área de estudo

A Lagoa de Extremoz ($5^{\circ} 43'06''\text{S}$ e $35^{\circ} 17'13''\text{W}$), situada no município de Extremoz no Rio Grande do Norte (Fig. 1), possui uma área de, aproximadamente, $3,6\text{km}^2$ com capacidade máxima de 11,02 milhões de m^3 (SEARH, 2016). A lagoa é responsável por 62% do abastecimento de água da região norte da cidade de Natal que possui mais de 300.000hab (SEMURB, 2009).



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

O município de Extremoz tem como temperaturas médias anuais $30,0^{\circ}\text{C}$ (máxima), $26,1^{\circ}\text{C}$ (média) e $21,0^{\circ}\text{C}$ (mínima) e uma umidade relativa do ar anual média de 77%. (IDEMA, 2013).

Dados

Nós utilizamos dados limnológicos que foram coletados entre 01/07/2012 e 09/08/2013 em dois pontos da Lagoa de Extremoz (Fig. 1). Deste estudo (edital 14/2010 proc. 476347/2010-6) foram utilizados as seguintes variáveis: temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), Clorofila A ($\mu\text{g/L}$), e radiação solar (W/m^2). Temperatura da água e radiação solar serviram como parâmetros de entrada do modelo enquanto clorofila-a como base para calibração.

Os dados referentes a vento (m/s) e evaporação (mm/dia) foram obtidos através das séries

históricas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), enquanto que os valores pluviométricos (mm/dia) foram obtidos através das séries históricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Estas séries temporais foram utilizadas como dados de entrada do modelo.

Modelagem e calibração

Para este trabalho utilizou-se o modelo e software IPHECO (<http://ipheco.org/pt-br/>) que consiste num modelo tridimensional e complexo desenvolvido para ambientes aquáticos como lagos, reservatórios e estuários. O modelo tem três módulos: hidrodinâmico, de nutrientes e biológico (FRAGOSO *et al.*, 2009), sendo capaz de descrever os comportamentos nas três dimensões utilizando ferramentas computacionais para resolver as equações diferenciais através de um método semi-implícito baseado em diferenças finitas (IPH – UFRGS, 2012b).

O modelo IPHECO segue um fluxo que compreende a definição de dados de entrada que são chamadas condições de contorno, variáveis, parâmetros, dimensões, condições iniciais e tipo de simulação a depender dos objetivos do modelador. Assim por exemplo, o módulo hidrodinâmico simula a variação do nível d'água, os fluxos e as trocas de calor envolvidas nos deslocamentos, permitindo a inserção de vazões de entrada e saída e considerando o balanço hídrico com dados de precipitação e evaporação.

Por sua vez, o módulo de qualidade da água relaciona as variáveis químicas e biológicas em suas interações, com o modelo descrevendo os ciclos de nutrientes de fósforo e nitrogênio e quanto isto pode alterar a dinâmica da biota, especialmente fito e zooplâncton.

Dada a complexidade do modelo, há uma flexibilidade na delimitação de seu uso. É possível ativar ou desativar os módulos de acordo com a estrutura conceitual que mais se adeque a cada caso, permitindo simulações mais simples.

As equações que descrevem os comportamentos dos diversos parâmetros na água são bastante similares entre si. São funções que quantificam os níveis de concentração baseadas em balanço. Aqui faremos referências as principais para o nosso caso.

O fitoplâncton na água é calculado através de três equações distintas: fitoplâncton na água – peso seco (I), fósforo (II) e nitrogênio (III).

$$dPPhytW (I) =$$

$$\frac{uDloadPhyt}{sDepthW} + wDAssPhyt - wDRespPhytW - wDMortPhytW + \frac{-tDSetPhyt+tDResusPhyt}{sDepthW} - wDConsPhytZoo - wDConsPhytOni - wDConsPhytPlank - aRelDeltaW \times sDPhytW$$

= carga + produção – respiração – mortalidade – sedimentação + resuspensão – consumo pelo zooplâncton – consumo pelo peixe omnívoro e planctívoro – correção pela deposição.

dPPhytW (II) =

$$\frac{uPloadPhyt}{sDepthW} + wPUptPhyt - wPExcrPhytW - wPMortPhytW + \frac{-tPSetPhyt+tPResusPhyt}{sDepthW} - wPConsPhytZoo - wPConsPhytOni - wPConsPhytPlank - aRelDeltaW \times sPPhytW$$

= carga + consumo de fósforo – excreção – mortalidade – sedimentação + resuspensão – consumo pelo zooplâncton – consumo pelo peixe omnívoro e planctívoro – correção pela deposição.

$$dPPhytW (III) = \frac{uNloadPhyt}{sDepthW} + wNUptPhyt - wNExcrPhytW - wNMortPhytW + \frac{-tNSetPhyt+tNResusPhyt}{sDepthW} - wNConsPhytZoo - wNConsPhytOni - wNConsPhytPlank - aRelDeltaW \times sNPhytW$$

= carga + consumo de nitrogênio – excreção – mortalidade – sedimentação + resuspensão – consumo pelo zooplâncton – consumo pelo peixe omnívoro e planctívoro – correção pela deposição.

Há, ainda, a parcela do fitoplâncton correspondente ao sedimento. As três equações correspondem às parcelas de peso seco (I), fósforo (II) e nitrogênio(III).

$$dDPhytS (I) = tDSetPhyt - tDResusPhyt - tDMortPhytS - tDRespPhytS - tDConsPhytBent$$

$$dPPhytS (II) = tPSetPhyt - tPResusPhyt - tPMortPhytS - tPRespPhytS - tPConsPhytBent$$

dNPhytS (III) =

$$tNSetPhyt - tNResusPhyt - tNMortPhytS - tNRespPhytS - tNConsPhytBent$$

= sedimentação – resuspensão – mortalidade – respiração ou excreção – consumo por zoobentos. Cada parcela dessa corresponde ao seu parâmetro, peso seco (D), fósforo (P) e nitrogênio(N).

O modelo permite uma discretização entre três grupos funcionais do fitoplâncton: algas verdes, cianobactérias e diatomáceas. Para todos os grupos, as equações são as mesmas. Cada variável das equações de balanço gerais que descrevem o comportamento do fitoplâncton tem sua particularidade. Enquanto algumas têm suas próprias equações outros são constantes que assumem valores dependendo das especificidades de cada objeto modelado.

Devido às restrições do conjunto de dados a modelagem aqui presente se focou no módulo de qualidade da água. Optou-se, inicialmente, por fazer uma simulação de 400 dias por corresponder, aproximadamente, à duração da coleta dos dados. O passo de cálculo escolhido foi de 30 segundos mas, a fim de melhorar a visualização dos resultados, o passo da saída foi de 30 dias, também próximo à frequência das coletas.

Não foram levadas em consideração as variações espaciais em quaisquer direções, isto é, optou-se pelo chamado modelo 0-D. Portanto, a discretização corresponde a apenas uma célula quadrada de 2,12km de lado e 3,5m de profundidade. Esta opção se justifica pelas pequenas dimensões da lagoa e seu comportamento hidrodinâmico que propicia uma boa mistura. Além disso, na época da amostragem os valores das variáveis apresentaram baixas variâncias.

As simulações dos parâmetros foram feitas isoladamente, isto é, após a calibração do modelo usando os dados de clorofila-a, cada cenário se concentrou em variar apenas um parâmetro meteorológico de entrada. Portanto, foram gerados, ao menos, cinco conjuntos de respostas de simulação alterando os valores de entrada para: evaporação, chuva, vento, temperatura da água e radiação solar.

Alguns dos cenários, ainda que correspondendo a situações que dificilmente ocorreriam na natureza, foram simulados para verificação da sensibilidade do modelo a situações críticas.

Os dados das variáveis temperatura da água e radiação solar, por questões de melhor ajuste do software, foram alocados ao modelo seguindo os módulos internos do IPHECO. Nestes dois casos, cada módulo, de sua respectiva variável, contém um modelo específico para gerar curvas que servirão como entrada do modelo geral. Diferentes equações com seus respectivos parâmetros são utilizadas nesta tarefa.

Para a temperatura, a equação utilizada pelo modelo leva em conta o balanço de calor:

$$\Delta Q = Q_{\text{RAOC}}^{\text{água}} + Q_{\text{RAOL}} - Q_{\text{RWOL}} - Q_{\text{COND}} - Q_{\text{EVAP}} \pm Q_{\text{IN/OUT}}$$

onde RAOC é o fluxo de calor referente à radiação atmosférica de onda curta, RAOL o fluxo referente à radiação atmosférica de onda longa, RWOL o fluxo referente à radiação da água de onda longa, QCOND o fluxo referente à condução térmica para a atmosfera, EVAP o fluxo de calor referente ao processo de evaporação e IN/OUT o fluxo de calor referente a processos de advecção (IPH- UFRGS, 2012a).

A conversão do balanço de calor para a temperatura se dá pela equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta Q}{\rho \cdot V \cdot c}$$

onde ρ é a densidade da água, V o volume e c o calor específico da água.

Os únicos parâmetros alterados dentro do módulo de temperatura de água foram os referentes à temperatura do ar, buscando-se gerar dez cenários igualmente espaçados no tocante às médias de temperatura a partir do modelo: cinco cenários com elevação da temperatura e cinco com diminuição.

Para a radiação solar, optou-se por um padrão senoidal para ajuste da curva que seria utilizada como parâmetro de entrada e os dados observados. Estabeleceu-se os valores máximos e mínimos anuais utilizando os valores observados a curva foi ajustada aos dados observados alterando-se os valores dos parâmetros.

De posse de todos os parâmetros de entrada observados ajustados à correta leitura do modelo, as simulações foram executadas. A partir daí, deu-se o processo de calibração do modelo ajustando os diferentes valores dos parâmetros referentes ao fitoplâncton (clorofila-a) para adequar os valores de saída do modelo aos observados em campo.

As condições iniciais referentes à profundidade, temperatura da água, clorofila-a, nitrogênio e fósforos dissolvidos coincidiram com os do primeiro mês do conjunto de dados observados.

Utilizou-se, para nortear as variações dos parâmetros, as faixas estabelecidas na literatura, especialmente em FRAGOSO et al. (2009) para todos os valores adotados.

Resultados

A temperatura mostrou um aumento nos meses de outubro a março e uma queda nos outros períodos, como o modelo descrevendo bem os valores observados (Fig. 2a). O mesmo para a radiação solar simulada que também variou sazonalmente (Fig.2b), mas com ajuste aos dados observados não tão bons como na temperatura, pois a radiação permanece quase constante a maior parte do ano.

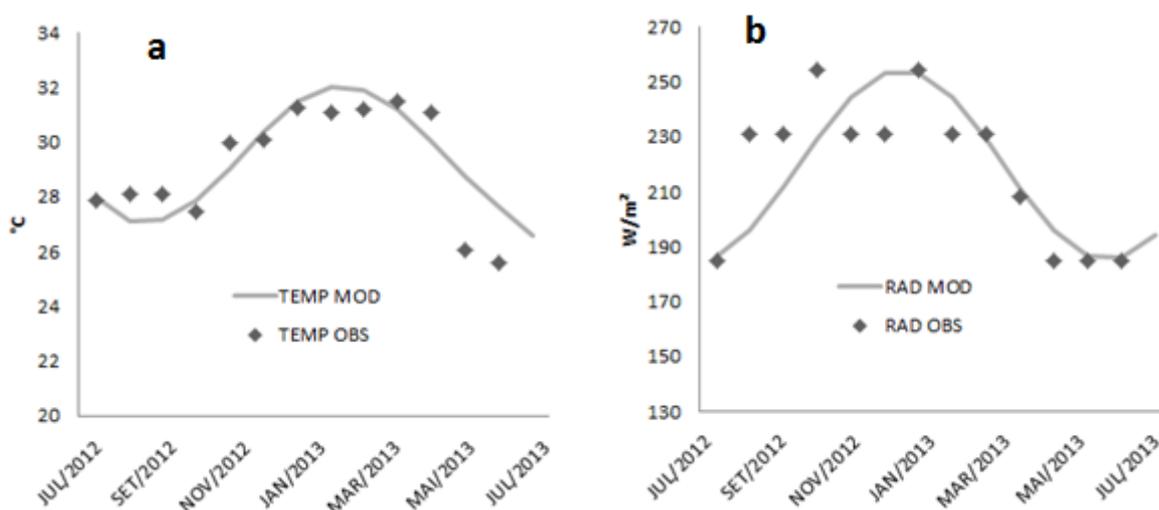


Fig. 2 – Ajuste do modelo IPHECO às variáveis de entrada temperatura (a) e radiação solar (b). Pontos: valores observados para a Lagoa de Extremoz, P1 (entre 01/07/2012 e 09/08/2013).

Os primeiros resultados com os valores de parâmetros sugeridos pelo software (default), como já era esperado, não se ajustaram bem os valores de clorofila-a observados, com pouca variação do clorofila-a e os valores simulados foram inferiores aos observados (resultados não mostrados aqui).

Os primeiros ajustes foram feitos aumentando a taxa de respiração constante para as algas ($kDRespPhyt$, 1/dia) e diminuindo o valor da velocidade de sedimentação para as algas ($cVSetPhyt$, m/dia). Os valores de $kDRespPhyt$ ficaram entre 0,02 para 0,045 enquanto que $cVSetPhyt$ entre 0,1 para 0,05 (Fig.3a).

Uma dificuldade que ainda persistiu com as mudanças destes dois parâmetros foram os valores demasiadamente altos em alguns pontos da curva do modelo (Fig. 3a). Para corrigir este problema, variou-se o parâmetro da taxa de mortalidade das algas total na água (kMortPhytW, 1/dia). O ajuste foi feito elevando o valor de 0,01 para 0,03. Os resultados obtidos com esses novos valores de parâmetros foram mais satisfatórios (Fig. 3b) quando comparados aos dados observados devido ao aumento dos valores de clorofila-a.

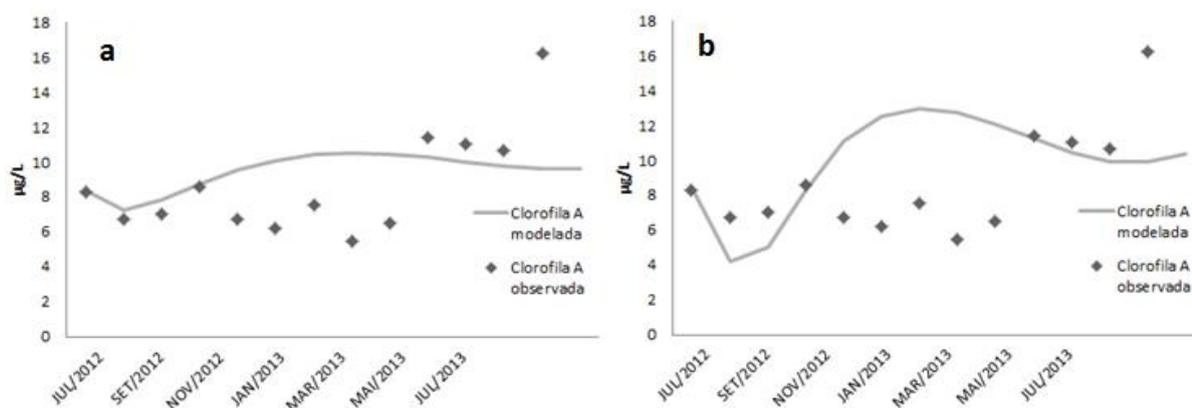


Fig. 3 – Dois ajustes do modelo IPHECO aos valores observados de clorofila-a para a Lagoa de Extremoz (RN): a: ajuste variando apenas os parâmetros referentes a respiração e sedimentação; b: ajuste com variação simultânea da taxa de mortalidade, respiração e sedimentação.

O modelo se ajustou satisfatoriamente a dois trechos específicos compreendidos entre os meses julho e novembro de 2012 e entre abril e julho de 2013, acompanhando bem a dinâmica da clorofila-a (Fig. 3b). Porém, entre dezembro de 2012 e março de 2013, o modelo não apresentou um ajuste tão bom deixando de captar as nuances da variação da clorofila.

Outras tentativas de melhorar o ajuste também foram realizadas. Assim, respeitando os intervalos dos valores de taxas conhecidas dos parâmetros elencadas (FRAGOSO; FERREIRA; MOTTA, 2009), incrementou-se o modelo com um módulo de zooplâncton para limitar o crescimento da clorofila-a. Os resultados porém não incrementaram o ajuste que permaneceu o mesmo (Fig. 3b).

A temperatura ótima para as algas totais (cTmOptPhyt, °C) e a temperatura ótima para o

zooplâncton ($cTmOptZoo$, °C) foram igualados em 30°C para que o impacto de um parâmetro não prevalecesse sobre o outro de forma desigual.

A taxa máxima de crescimento das algas total ($cMuMaxPhyt$, 1/dia) também foi alterada de 0,35 para 0,5 uma vez que os valores máximos de clorofila-a, agora sob efeito predatório do zooplâncton, estavam aquém dos observados. No tocante ao zooplâncton, o fator de seletividade das algas totais ($cPrefPhyt$) foi alterado de 0,128 para 0,1, uma vez que os valores mais baixos de clorofila-a estavam inferiores aos observados. O fator de seletividade por detritos ($cPrefDet$), foi alterado de 0,03 para 0,05 para auxiliar nos altos valores de pico do clorofila-a.

Estas modificações se não alteraram a qualidade do ajuste da clorofila-a ao menos, tornaram o modelo mais complexo e sensível às variações meteorológicas. Por isto, optou-se, pelo modelo clorofila-a + zooplâncton para realizar todas as simulações. Em cada uma delas, o parâmetro base de comparação foi a clorofila-a. Porém, as variações hidrodinâmicas e de temperatura da água serviram de base para aferir se os comportamentos esperados para cada parâmetro meteorológico variado estava, de fato, ocorrendo no modelo. O novo paradigma de comparação deixou de ser os valores observados para ser, apenas, o modelo.

Os resultados das simulações alterando as variáveis evaporação, chuva e vento são mostrados na Fig. 4, acompanhados dos respectivas alterações nos valores simulados de clorofila-a.

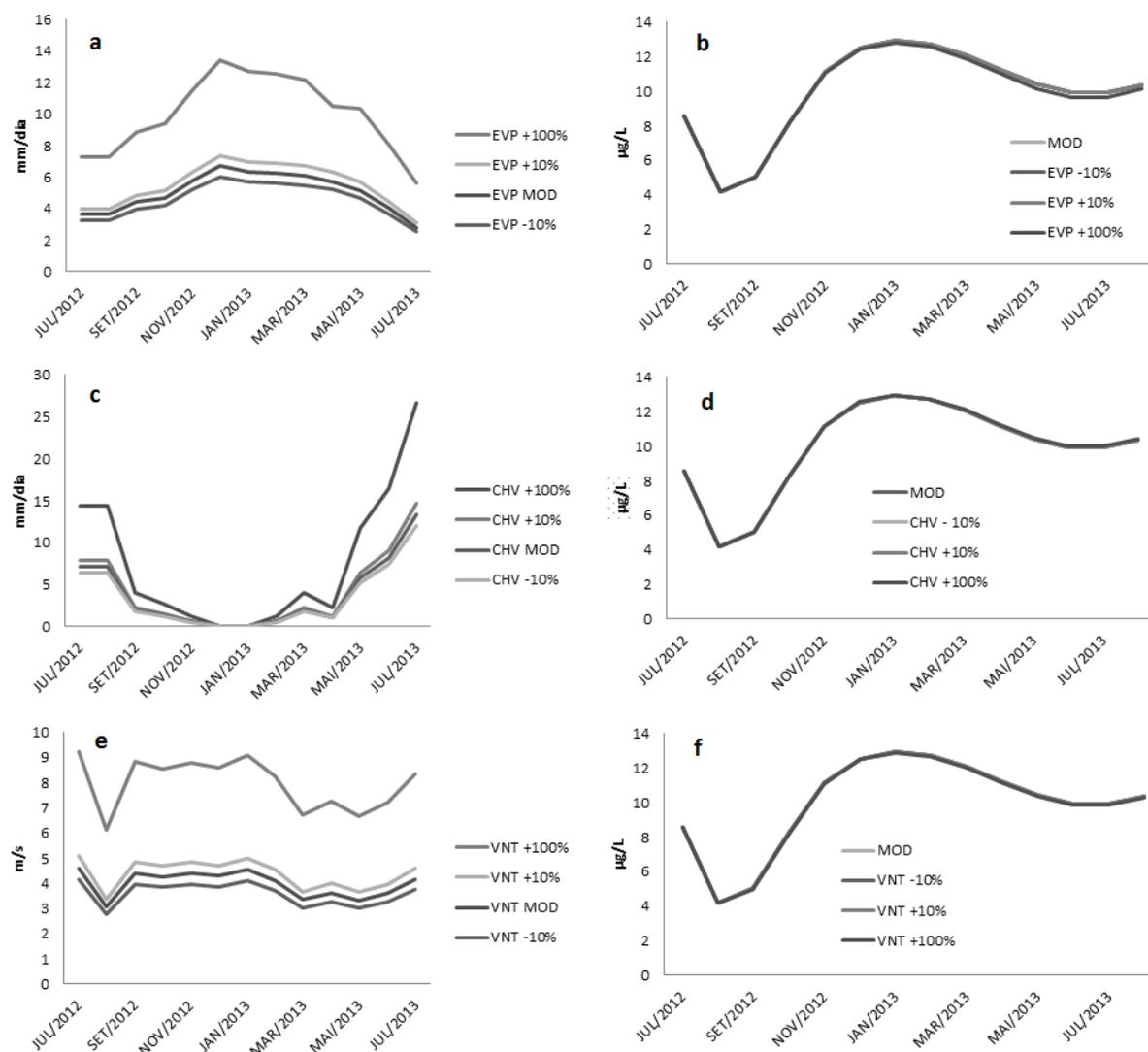


Figura 4 – Alterações nos valores das variáveis de entrada no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: alteração na evaporação, b: clorofila-a após variação da evaporação; c: alteração na chuva, d: colorofila-a após variação da chuva; e: alteração no vento; f: clorofila-a após variação do vento.

Nenhuma das alterações nas três variáveis provocaram mudanças nas respostas simuladas de clorofila-a (Fig. 4). De qualquer forma, alterações na evaporação mudaram a média do nível d'água da lagoa: assim o nível da água se elevou 0,1m quando houve uma redução de 10% na série de evaporação. O aumento de 10% na evaporação provocou uma redução de 0,1m na média e o aumento de 200% na evaporação provocou uma redução de 0,98m, mostrando que o parâmetro altera os resultados de outras variáveis mas não de clorofila-a (Fig. 4a e 4b).

O mesmo ocorre para a chuva que quando reduzida em 10%, reduz o nível da água em 0,05m e quando aumentada em 10%, aumenta o nível em 0,05m, porém quando aumentada em 200%, a elevação do nível d'água foi de 0,5m. Porém os valores de clorofila-a quase nem são afetados (Fig. 4c e 4d).

Novamente, as simulações realizadas variando apenas a variável vento não alteraram os valores simulados de clorofila-a (Fig. 4e e 4f).

As simulações das variações de temperatura e respectivas respostas funcionais de clorofila-a são mostradas na Figura 5. As temperaturas médias dos cinco cenários em ordem crescente foram: 29,3°C (modelo), 30,4°C, 31,3°C, 32,3°C, 33,2°C e 34,2°C. Os valores de clorofila a acompanham as variações de temperatura. Ao passo que a temperatura aumenta (Fig. 5a), também aumenta a clorofila-a em geral (Fig. 5b), um comportamento esperado. Com tendências próximas quando a temperatura é reduzida (Fig. 5c e 5d).

O modelo indica que o clorofila-a se desenvolve em sua maior potencialidade em valores próximos a 25°C entre os cenários simulados. Os comportamentos de todas as curvas foram similares no sentido de acompanhar a evolução da temperatura. Porém, valores baixos de temperatura apresentaram maior sensibilidade levando a maiores diferenças entre estes cenários e os valores originalmente simulados.

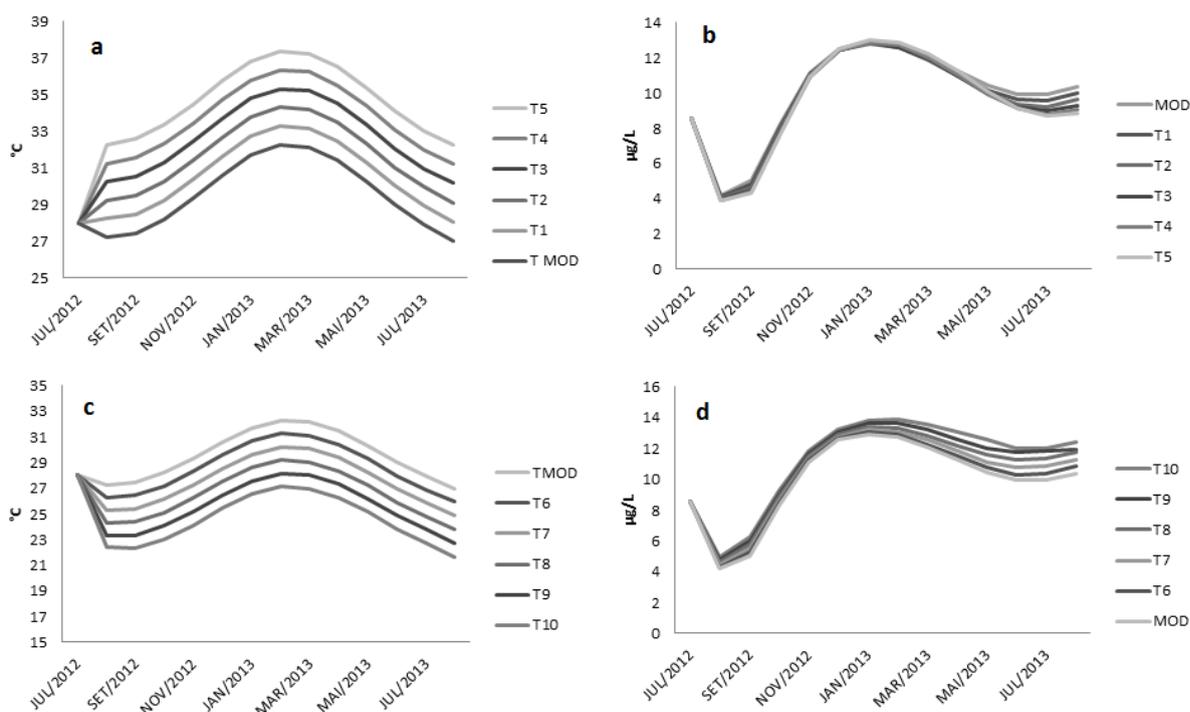


Figura 5 – Alterações nos valores da variável temperatura no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: simulações de aumento, b: resposta da clorofila-a aos aumentos; c: simulações de redução, d: resposta da clorofila-a as reduções.

Os resultados das simulações alterando a radiação solar são mostrados na Figura 6. Um pouco diferente da temperatura, neste caso as alterações na clorofila-a foram um pouco maiores mas nada que comprometesse as tendências. As curvas foram geradas com os parâmetros de modelagem específicos da radiação, de forma análoga à temperatura. A diferença de um cenário para outro foi constante de 10W/m^2 , exceção à RAD1 que foi 15W/m^2 com relação à RADModelada.

A clorofila a tendeu a aumentar com o aumento da radiação solar, comportamento que era esperado. A curva acompanha a radiação do cenário com os vales e picos praticamente coincidindo. Essa relação foi mais evidente que a temperatura sugerindo que a relação é mais direta.

Há uma indicação clara que a sensibilidade do modelo à diminuição da radiação solar é maior que a sensibilidade à diminuição temperatura uma vez que as diferenças percentuais entre os

cenários críticos e o modelo são maiores na radiação do que na temperatura.

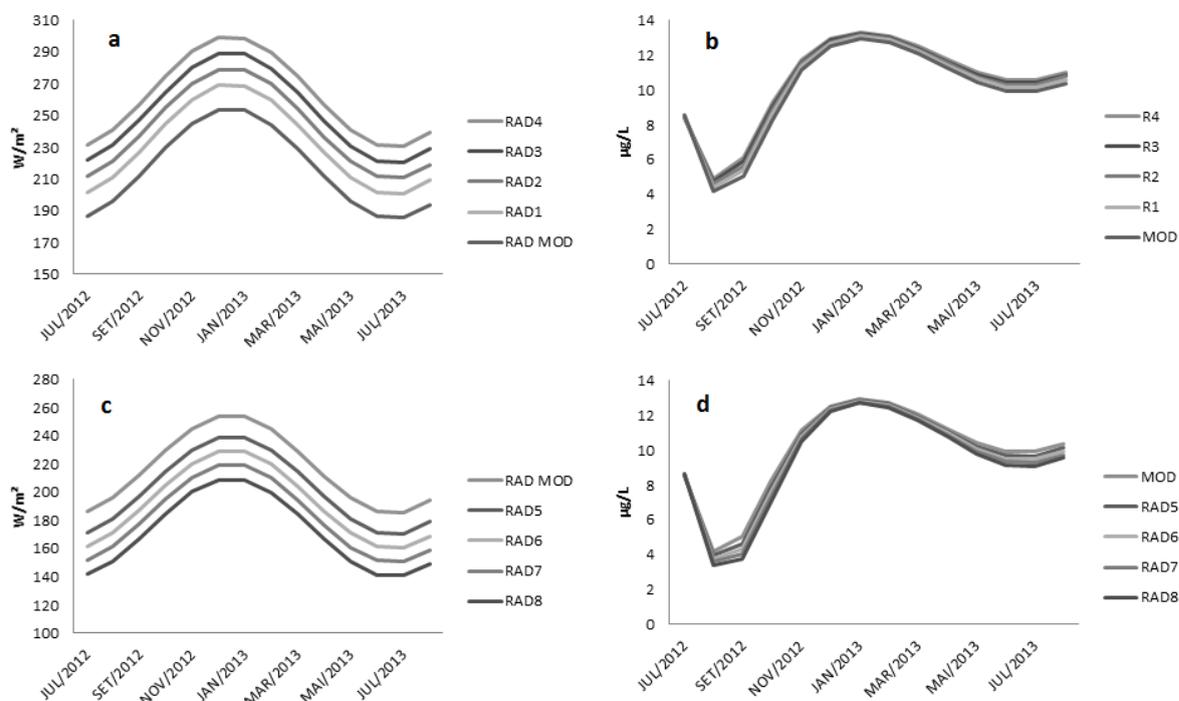


Figura 6 – Alterações nos valores da variável radiação no modelo, com respectivas respostas da dinâmica de clorofila-a simuladas pelo modelo IPHECO para a Lagoa de Extremoz (RN). a: simulações de aumento, b: resposta da clorofila-a aos aumentos; c: simulações de redução, d: resposta da clorofila-a as reduções.

Agrupando mudanças das variáveis temperatura e radiação numa mesma simulação, os resultados foram um pouco, mais consistentes na alteração dos valores simulados originalmente (Fig. 7). Assim, mantendo a temperatura mínima ($24,7^{\circ}\text{C}$) e a radiação máxima ($261,15 \text{ W/m}^2$) durante toda a simulação (Fig. 7a), a dinâmica da clorofila a foi similar, porém num nível mais alto que o original. Pelo contrário, colocando uma temperatura máxima ($34,2^{\circ}\text{C}$) e a radiação mínima ($171,15 \text{ W/m}^2$) os resultados foram bem mais similares ao original, mostrando que a clorofila-a simulada é mais sensível a alterações na radiação do que a temperatura.

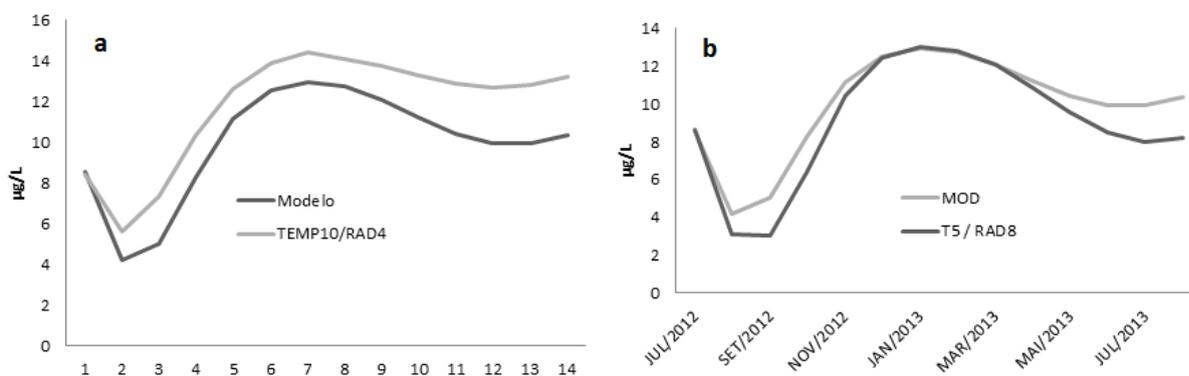


Figura 7 – Resultados das simulações de clorofila-a pelo IPHECO quando se altera conjuntamente as variáveis temperatura e radiação solar; a: temperatura mínima (24,7°C) e a radiação máxima (261,15 W/m²) durante toda a simulação; b: temperatura máxima (34,2°C) e a radiação mínima (171,15 W/m²) durante toda a simulação.

Discussão

O modelo IPHECO, na versão 0-D, devidamente calibrado simulou, em nosso entendimento, satisfatoriamente a variação de clorofila-a da Lagoa de Extremoz. O modelo, porém é insensível às variações de caráter hidrodinâmico como chuva e evaporação.

Variações de temperatura e radiação solar apresentaram valores razoáveis mas ainda inferiores aos esperados. As variações com diferentes cenários de vento também se mostrou insensível uma vez que pouco interferiu na temperatura da água ou em outros processos dinâmicos que interferissem na dinâmica do fitoplâncton.

A clorofila-a, que neste caso representa os dados de produção primária ou fitoplâncton, é uma variável altamente dependente de diversas variáveis ambientais como evaporação, chuva, vento, temperatura e radiação (FRENCH, 2007; JEPPESE, 2001). Por isto em muitos casos é analisada numa perspectiva multi-variada (PINTO; BECKER, 2014). Porém nossas simulações não identificaram alterações suficientemente expressivas, o que nos leva a suspeitar da sensibilidade do modelo IPHECO como uma ferramenta útil nestes casos.

É sabido que modelos são simplificações do mundo real (ANGELINI; GOMES, 2008), mas os resultados de suas simulações têm de estar em acordo com os dados observados, ou na falta destes, com o conhecimento adquirido para aquele fenômeno especificamente (ANGELINI *et al.*, 2013).

Um conjunto pequeno de dados, como neste caso, tem maior chance de representar um comportamento atípico do que numa longa série histórica, na qual os padrões podem ser melhor identificados. Desta forma, como a série aqui estudada é pequena, corre-se o risco de estarmos analisando a um comportamento atípico da clorofila-a da lagoa. Neste trabalho, em questão, optou-se por não simular cenários com longa duração para não incorrerem em maiores problemas, pois nossa calibração foi baseada em um conjunto de dados restrito a um ano.

O modelo IPHECO em suas versões 2-D e 3-D já foi aplicado em alguns ambientes (SOUZA *et al*, 2016; FRAGOSO, 2009; FRAGOSO, 2011) com muito sucesso, simulando fielmente variações tanto de quantidade como de qualidade da água. Porém, não há nenhuma publicação do uso do modelo IPHECO em sua versão 0-D, isto é, esta versão nunca foi realmente testada ou teve sua análise de sensibilidade averiguada, lacuna que preenchemos aqui com este trabalho.

Nossas conclusões sobre esta versão do software IPHECO, é que ele não funciona a contento, pois além de não permitir ao usuário entrar com os dados observados de temperatura e radiação solar, usando ao invés disto curvas da literatura e que refletem apenas parcialmente os dados locais, a alteração dos valores das variáveis que mais tenderiam a modificar a clorofila-a pouco a afetaram. Isto significa que a versão 0-D do modelo IPHECO deixa a desejar e deve ser evitada especialmente para simulações mais complexas como as que mimetizariam entradas de esgoto ou entradas difusas de fósforo e nitrogênio na água.

Referências

ARHONDITSIS, G. B. et al. (2004) Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Water Research*, [s.l.], v.38,n.18,p.4013-4027.

ANGELINI, R.; GOMES, L. C. (2008). O artesão de ecossistemas: construindo modelos com dados. Maringá (pr): v.1,188 p.

ANGELINI, R.; ROONY, J. M.; CATELLA, A. C.; RESENDE, E. K.; LIBRALATO, S. (2013) Aquatic food webs of the oxbow lakes in the Pantanal: A new site for fisheries guaranteed by alternated control?. *Ecological Modelling*, [s.l.],v.253,p.82-96.

CARPENTER, S.R.; CARACO, N. F.; CORREL, D. L.; HOWARTH, R. W.; SHARPLEY, A. N.; SMITH, V. H. (1998) Nonpoint pollution of surfasse water with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, v.8,n.3,p.559-568.

CORRELL, D. L. (1998) The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review. *Journal Of Environment Quality*, [s.l.],v.27,n.2,p.261-266.

DOWNING, J. A.; MCCAULEY, E. (1991) The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnology And Oceanography, Quebec*,v.5,n.37,p.936-945.

EDMONDSON, W. T. (1972) Nutrients and phytoplankton in Lake Washington, *American Society of Limnology and Oceanography. Spec. Symp 1*, p.172–193.

FRAGOSO, C. R.; NES, E. G. V.; JANES, J. H.; MARQUES, D. M. (2009) IPH-TRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, [s.l.],v.24,n.11,p.1347-1348,

FRAGOSO, C. R.; MARQUES, D. M. L. M.; FERREIRA, T. F.; HANSE, J. H.; NES, E. H. V. (2011) Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. *Environmental Modelling & Software*, [s.l.],v.26,n.11, p.1337-1348..

FRAGOSO JR, C. R.; FERREIRA, T. F.; MOTTA MARQUES, D. M. L. (2009) Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos. 1. ed. Oficina de Textos. v.1. 304p.

FRENCH, Todd D.; PETTICREW, E. L (2006). Chlorophyll a seasonality in four shallow eutrophic lakes (northern British Columbia, Canada) and the critical roles of internal phosphorus loading and temperature. *Hydrobiologia*, [s.l.],v.575, n.1, p.285-299.

GERTSEV, V.I.; GERTSEVA, V.V. (2004). Classification of mathematical models in ecology. *Ecological Modelling*, [s.l.], v. 178, n. 3-4, p.329-334.

GONÇALVES, R. J.; VILLAFANE, V. E.; MEDINA, C. D.; BARBIERI, E. S.; HELBLING, W. E. (2011) Plankton dynamics and photosynthesis responses in a eutrophic lake in Patagonia(Argentina): influence of grazer abundance and UVR. *Latin American Journal Of Aquatic Research*, v.1, n.39, p.117-130.

IBGE. (2014) Municípios, total e com serviço de esgotamento sanitário por rede coletora, por natureza jurídica das entidades prestadoras de serviço, segundo os grupos de tamanho dos municípios e densidade populacional. 2008a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb2008/tabelas_pdf/tab049.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2014.

IDEMA. (2013) Perfil do seu município. Extremoz, 21p.

IPH - UFRGS. (2012a) Manual Científico do IPH-ECO Model. Porto Alegre: UFRGS, 87p.

IPH - UFRGS. (2012b) Manual do Usuário do IPH-ECO Model. Porto Alegre: UFRGS, 87 p.

JEPPESEN, E.; MOSS, B.; BENNION, H.; CARVALHO, L.; DEMEESTER, L.; FEUCHTMAYR, H.; FRIBERG, N.; GESSNER, M. O.; HEFTING, M.; LAURIDSEN, T. L.; LIBORIUSSEN, L.; MALMQUIST, H. J.; MAY, L.; MEERHOFF, M.; OLAFSSON, J. S.; SOONS, M. B.; VERHOEVEN, T. A. (2010) Interaction of Climate Change and Eutrophication. Kernan/climate Change Impacts On Freshwater Ecosystems, *in: Climate change impactos on freshwater ecosystems: direct effects and interactions with other stresses*. [s.l.], p.119-151.

KOZAK, A.; DONDAJEWSKA, R. KOWALCZEKSA-MAUDRA, K.; GOLDY, R.; HOLONA, T. (2013) Water quality and phytoplankton community in selected recreational lakes and reservoirs under restoration measures in western Poland. *Polish Journal Of Natural Science*, v.28,n.2,p.217-226.

LEBRETON, J. D. (1992) Modeling survival and testing biological hypotheses using marked animals – a unified approach with case-studies. *Ecological Modelling*, v.62, n1,p.67-11.

LOPES, H.; SOBRAL, M. C.; GUNKEL, G.; CANDEIAS, A. L.; MELO, G. (2015). Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s.l.],v.20,n.3,p.475-484.

MALMAEUS, J. M.; HÅKANSON, L. (2004) Development of a Lake Eutrophication model. *Ecological Modelling*, [s.l.],v.171,n.1-2,p.35-63.

MCKINNON, J.S.; TAYLOR, E.B. (2012) Biodiversity: Species choked and blended. *Nature*, [s.l.],v. 482,n.7385,p.313-314.

MOSS, B. (2011) Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters*, [s.l.],v.1, n.2,p.101-105.

PRETTY, J. N.; MASON, C. F.; NEDWELL, D. B.; HINE, R. E.; LEAF, S.; DILS, R. (2003) Environmental Costs of Freshwater Eutrophication in England and Wales. *Environmental Science & Technology*, [s.l.],v.37,n.2,p.201-208.

PINTO, T. S.; BECKER, V. (2014) Diel dynamic of phytoplankton functional groups in a tropical water supply, Extremoz Lake, northeastern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, [s.l.],v.26,n.4,p.356-366.

ROLLNIC, M.; MEDEIROS, C. (2013) Application of a Probabilistic Sediment Transport Model to Guide Beach Nourishment Efforts. *Journal of Coastal Research*. v.65, p.1856-1861.

SANTOS, M. L. S.; SARAIVA, A. L. L.; PEREIRA, J. A.; NOGUEIRA, P. F. R. S. M.; DA SILVA, A. C. (2015) Hydrodynamic modeling of a reservoir used to supply water to Belem (Lake Agua Preta, Para, Brazil). *Acta Sectorium*. v.37, p. 353.

SEARH. (2016) Situação volumétrica de reservatórios do RN. 2016. Disponível em: <<http://sistemas.searh.rn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/Monitoramento/FichaTecnica?idReservatorio=1038>>. Acesso em: 02 jun. 2016.

SEMURB. (2009) Natal em Dados. Natal, 26 p.

SILVA, T. F. G.; VIÇON-LEITE, B.; GIANI, A.; FIGUEIREDO, C. C.; PETRUCCI, G.; LEMAIRE, B.; SPERLING, E. V.; TASSIN, B.; SEIDL, M.; KHAC, V. T.; VIANA, P. S.; VIANA, V. F. L.; TOSCANO, R. A.; RODRIGUES, B. H. M.; NASCIMENTO, N. O. (2016) Modelagem da Lagoa da Pampulha: uma ferramenta para avaliar o impacto da bacia hidrográfica na dinâmica do fitoplâncton. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, [s.l.], v.21,n.1,p.95-108.

SOUZA, F. F. C.; RIBEIRO, C. B. M.; FRAGOSO JR, C. R.; OTENIO, M. H. (2016) Modelagem do regime térmico de um reservatório tropical de abastecimento público, Juiz de Fora, MG, Brasil. *Rev. Ambient. Água*,v.11,n.1,pp.60-74.

SMITH, V.H. (2003) Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environment Science and Pollution Research*,v.10,n.2,p.126-139.

WHO. (1999) Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. London And New York: St Edmundsbury Press.

XIA, R.; ZHANG, Y.; CRITTO, A.; WU, J.; FAN, J.; ZHENG, Z.; ZHANG, Y. (2016) The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. *Sustainability*, [s.l.], v.8,n.3,p.229-245.

YANG, X.; WU, X.; HAO, H.; HE, Z. (2008) Mechanisms and assessment of water eutrophication. *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, [s.l.],v.9,n.3,p.197-209.