

WORKSHOP

Modelagem
Computacional
de Reservatórios

Gestão para Sustentabilidade

24 e 25 de Outubro/2013 - Fortaleza/Ce
Auditório das Águas/Cogerh



Modelagem ecológica de reservatórios tropicais sob o efeito do aporte de fósforo

Ricardo Motta Pinto-Coelho
Guest Professor at IAFS University of Florida

&

Gutemberg Santos Medeiros
Aquicultura UFMG



Porquê

é importante entender o metabolismo do fósforo nos sistemas aquáticos epicontinentais?

O fósforo (P) é um elemento mineral presente em todos os organismos vivos. Ele é fundamental para a vida tal como a conhecemos. O elemento está presente no DNA (Ácido Desoxirribonucleico) e o RNA (Ácido Ribonucleico) e nas membranas celulares. É um elemento central no sistema ATP-ADP armazena e libera a energia química dentro das células de plantas, animais, bactérias e vírus. Nos vertebrados, a sua presença possibilita a contração dos músculos e ainda é vital na formação dos dentes e ossos.

Apesar de toda importância para a vida a disponibilidade do fósforo nas águas continentais é muito reduzida, por natureza. Essa característica o torna um elemento-chave, limitante para toda a vida aquática existente nas águas interiores.

Legenda:

- Elemento essencial a todos os organismos
- Elemento essencial aos animais
- Elemento essencial a alguns organismos
- Elemento potencialmente tóxico na biosfera

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88																
Lantanídeos		Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71		
Actinídeos		Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103		

Tabela periódica de elementos (Pinto-Coelho, 2000)

Lei do Mínimo (Justus Liebig, 1840)

Trata-se do precursor no estudo das relações entre plantas e nutrientes. Ele notou que as plantas geralmente não estavam limitadas por substâncias necessárias em grandes quantidades tais como o CO_2 ou H_2O mas por certos elementos que são ou podem tornar-se raros no ambiente (B, Zn, P). Ele então formulou o princípio de que o desenvolvimento das plantas depende daquele elemento essencial que estiver em concentrações iguais ou menores do que o “mínimo” necessário.



52.1 Liebig'sches Minimumgesetz. Der Stoff, der jeweils im Minimum liegt, wird zum wachstumsbegrenzenden Faktor. In Seen war der Phosphor lange Zeit der begrenzende Faktor.

A maioria

das algas fitoplanctônicas responde com aumentos importantes em suas taxas de crescimento a qualquer aumento na concentração de ortofosfato no meio de cultura.

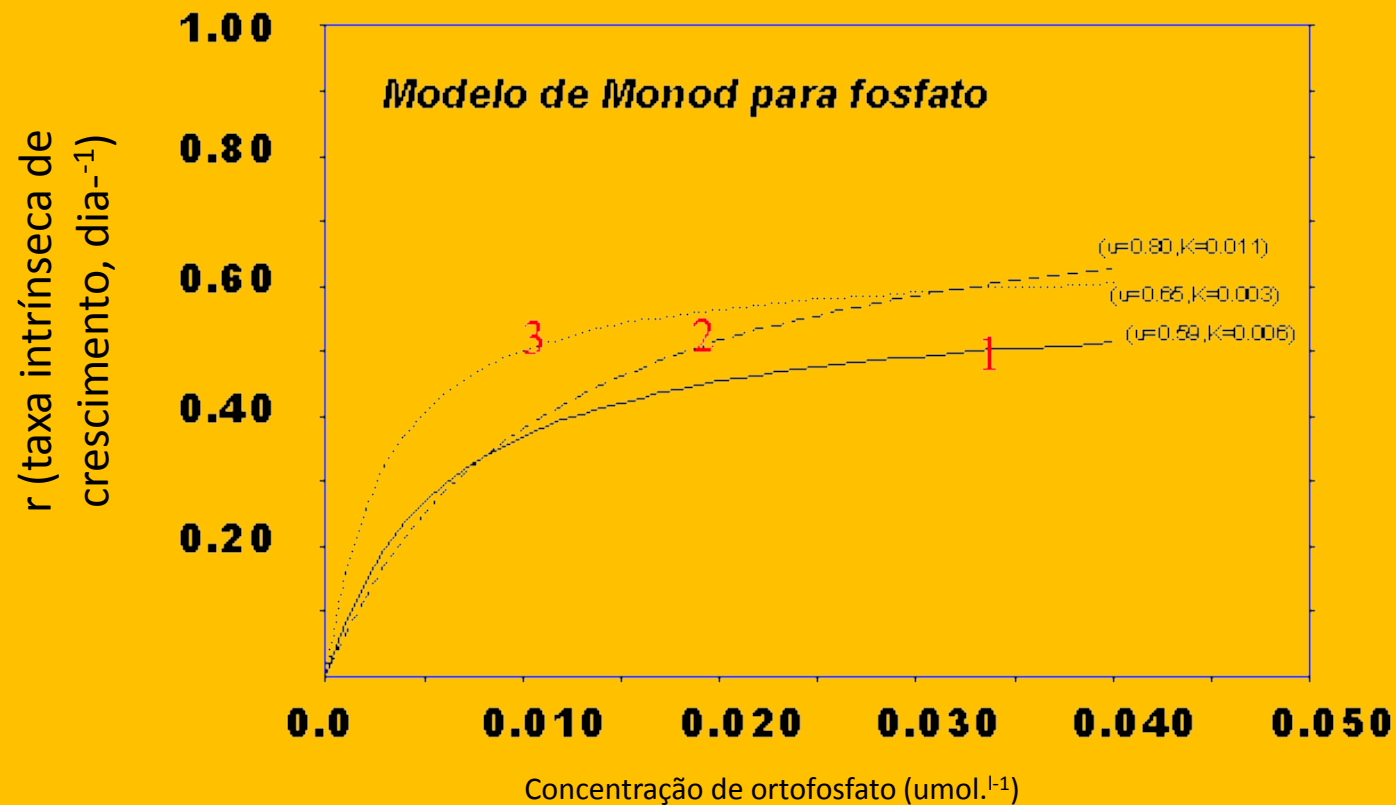


Figure 3 Modelo de Monod para o crescimento de três algas fitoplanctônicas segundo a sua capacidade em absorver fosfato

Podemos

Modelar os ganhos e perdas de biomassa em um dado nível trófico usando o modelo de Monod. O ponto R^* é o ponto onde os ganhos de biomassa se equivalem as perdas. Nesse patamar a população permanece estável, algo raro sob condições naturais.

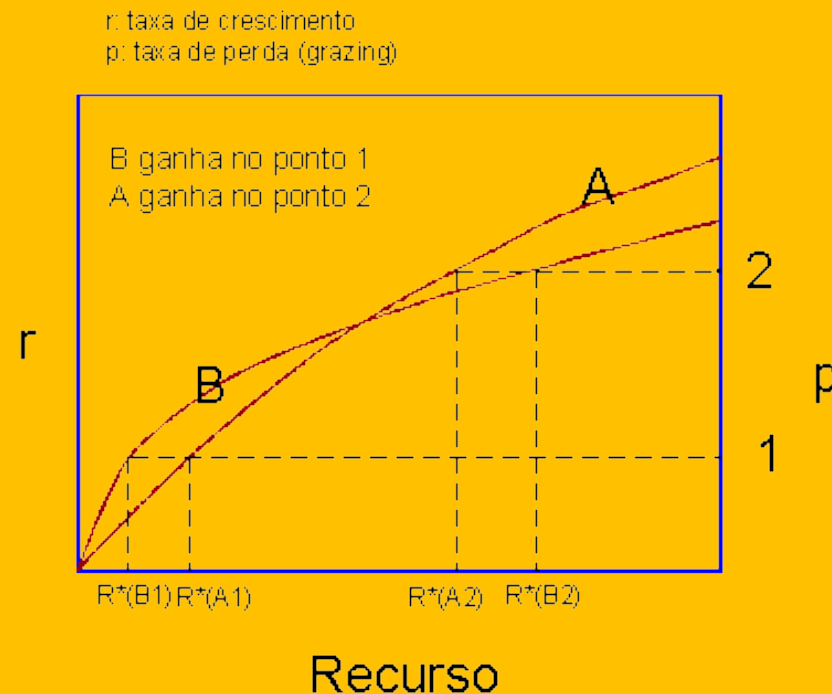
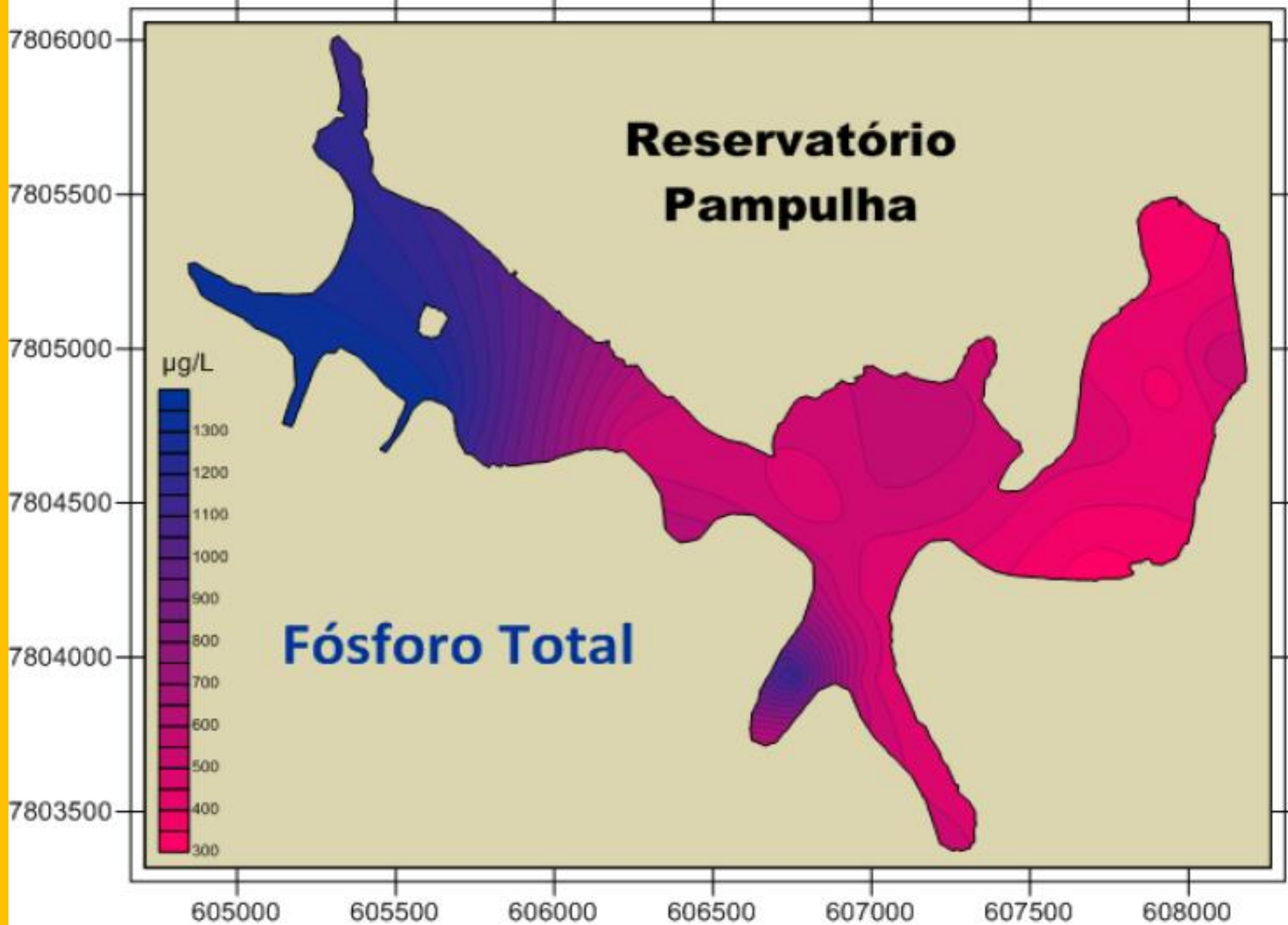
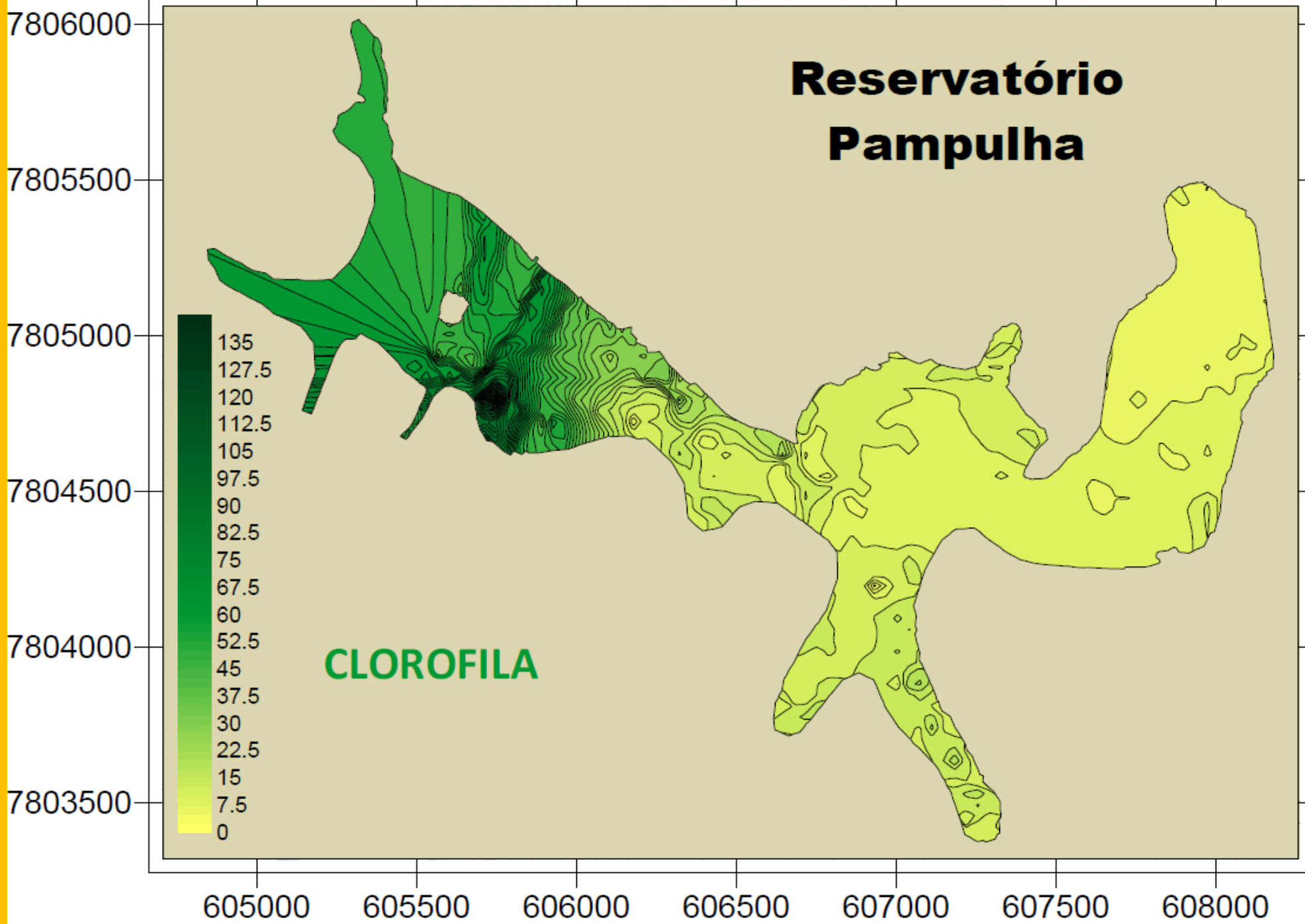


Figure 4 Dependência da taxa instantânea de crescimento (r) e a concentração de um recurso potencialmente limitante saegundo o modelo de Monod (original).





Represa da Pampulha

Monitoramento de Longa Duração

1993-1998

Coletas Semanais

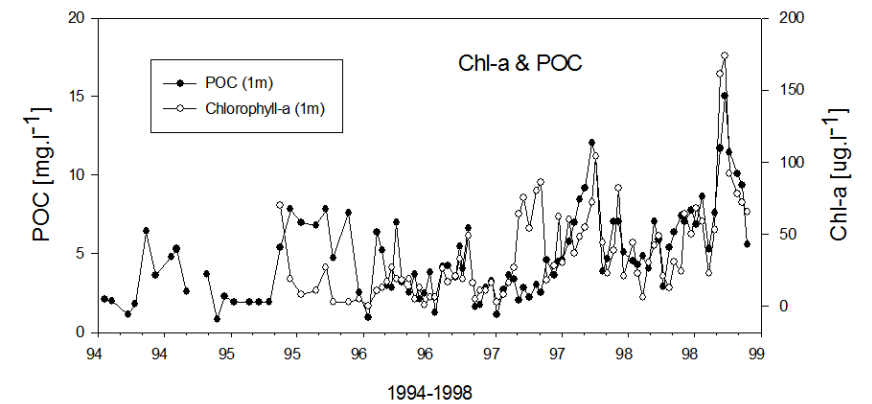
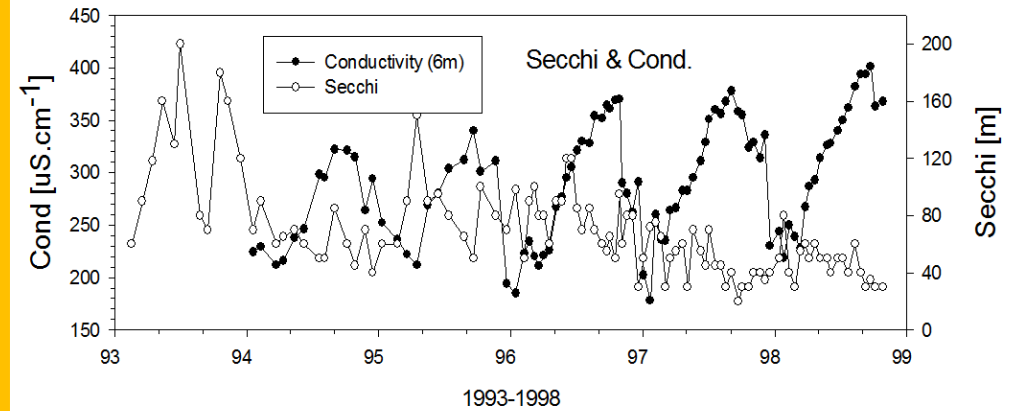
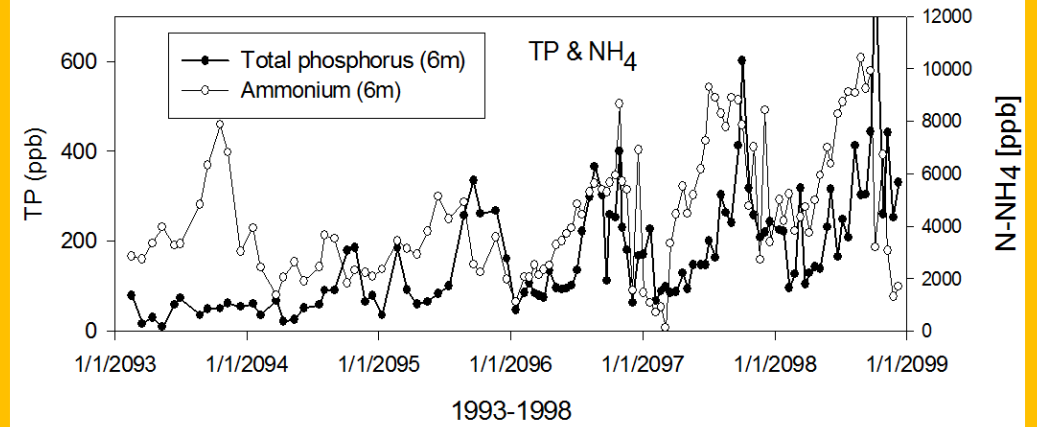
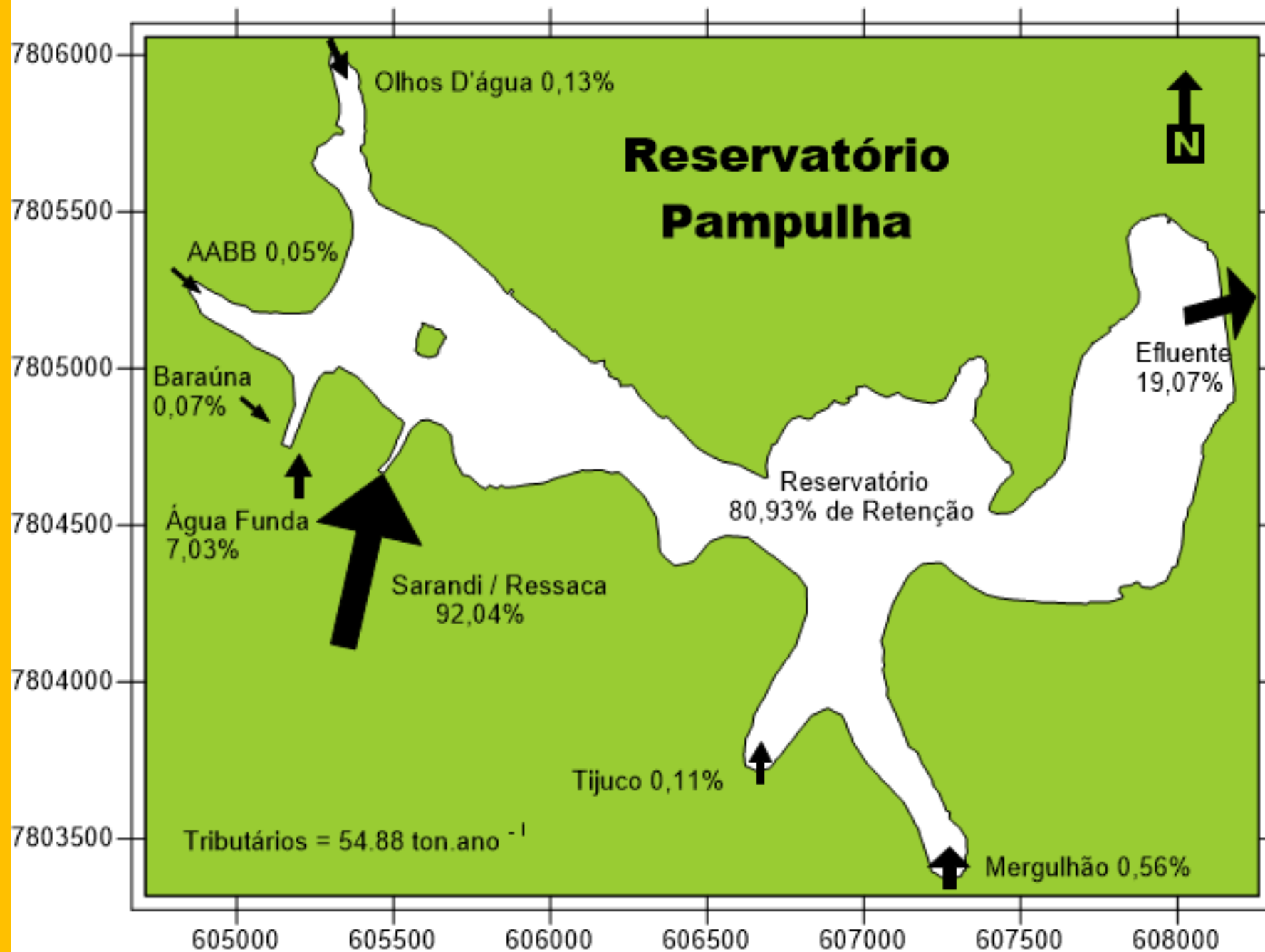
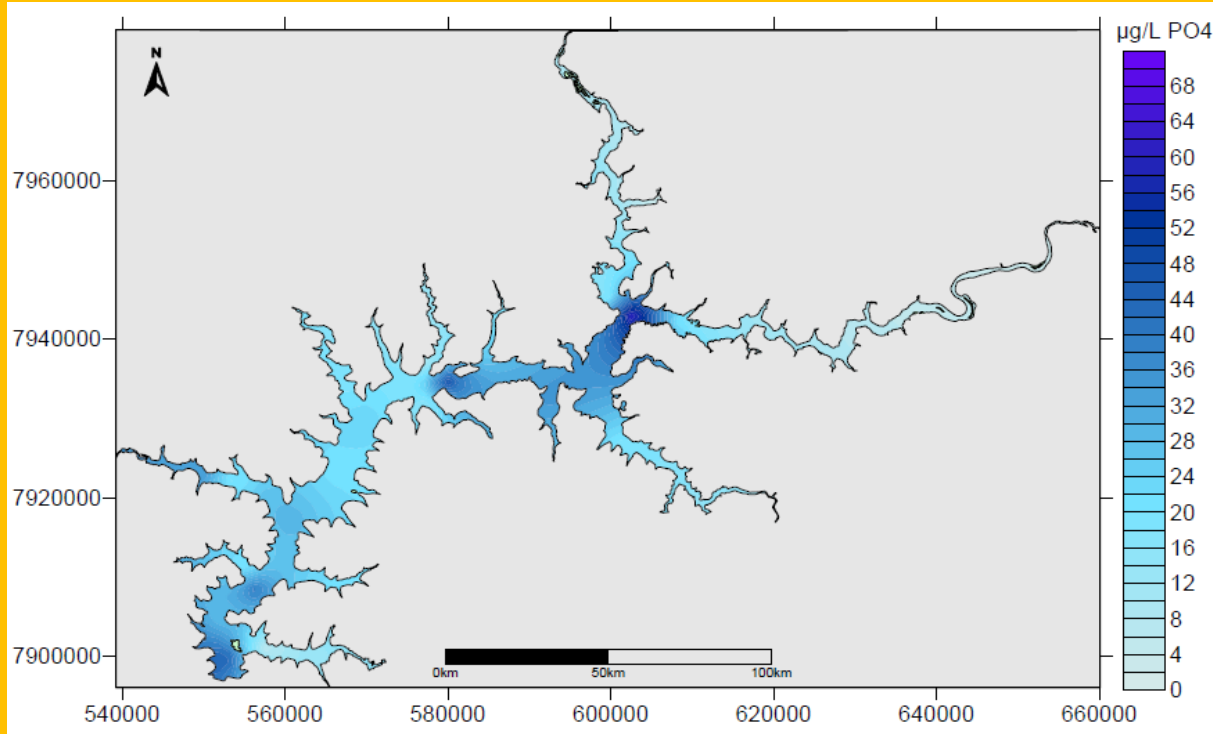


Fig. 1

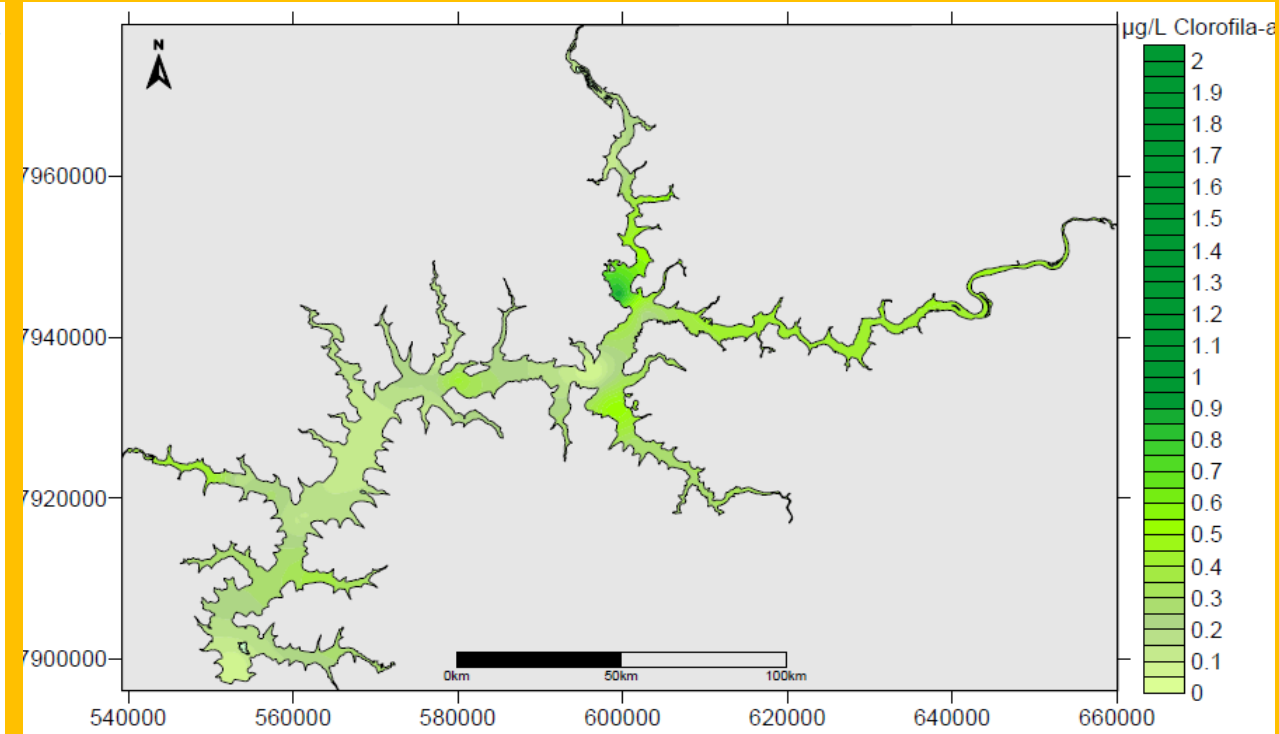


Res. São Simão
Fósforo Total (mg.m^{-3})



Fósforo
Reservatório de São Simão GO/MG
8.mai.2012 a 10.mai.2012

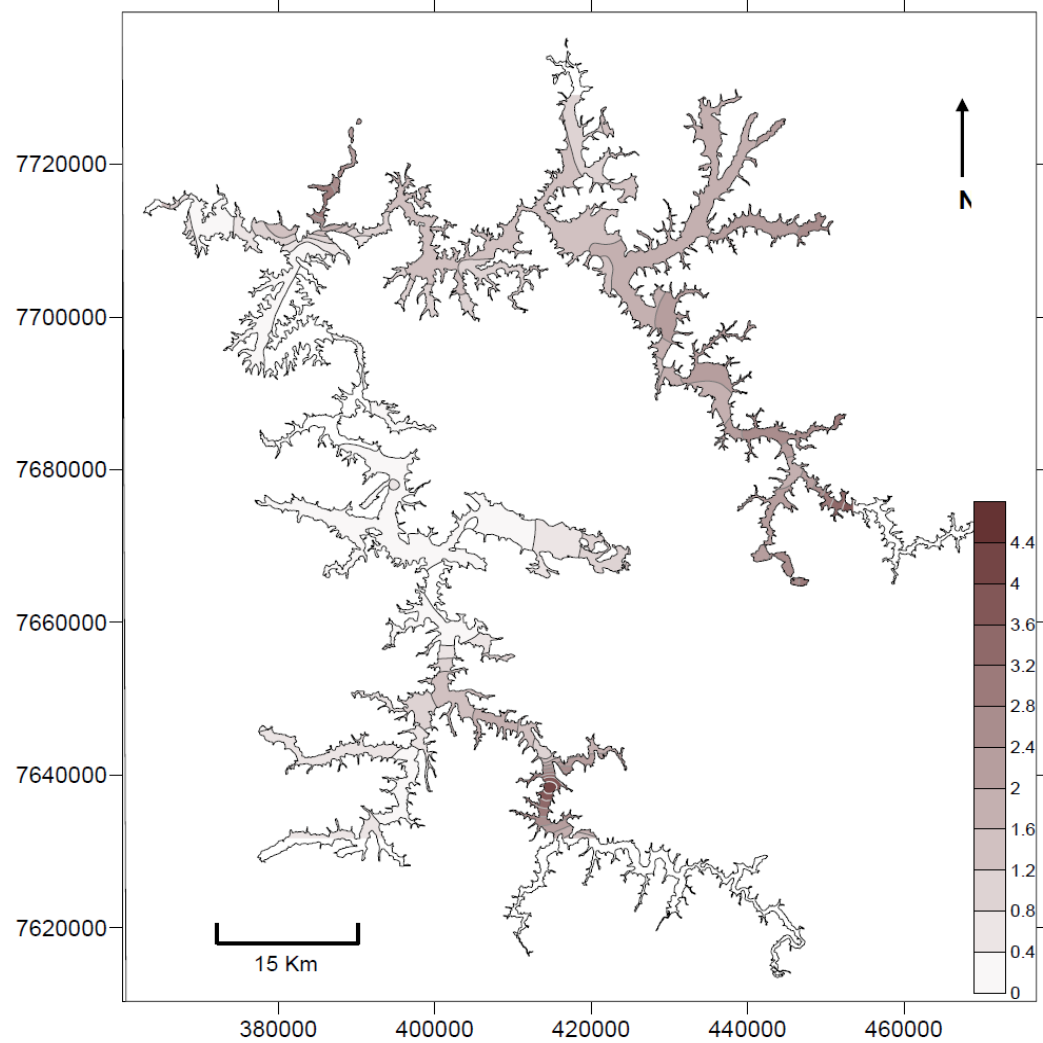
Res. São Simão
Clorofila-a (mg.m^{-3})



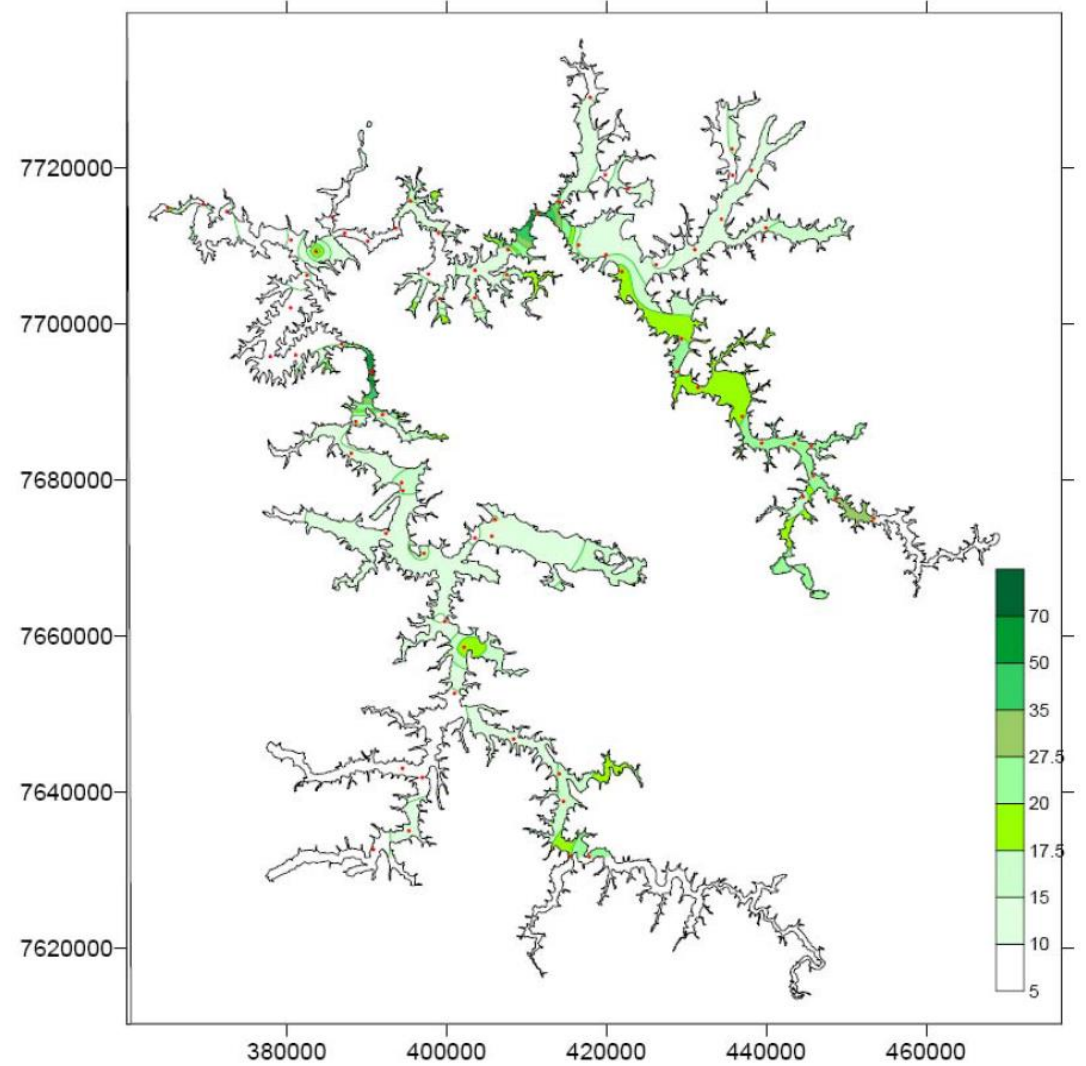
Clorofila-a
Reservatório de São Simão GO/MG
8.mai.2012 a 10.mai.2012

Os reservatórios tropicais localizados no Brasil são um bom exemplo ilustrando as íntimas associações entre a disponibilidade de fósforo e as concentrações de clorofila-a do fitoplâncton.

Res. Furnas
Fósforo Total ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)



Res. Furnas
Clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)

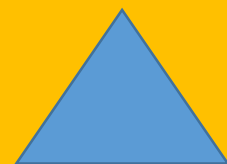


Os reservatórios tropicais localizados no Brasil são um bom exemplo ilustrando as íntimas associações entre a disponibilidade de fósforo e as concentrações de clorofila-a do fitoplâncton.



Alimento (POC, mgC.L^{-1})
P-Content
(% P biomassa)

N-NH_4 , P-PO_4^{-3} , CO_2

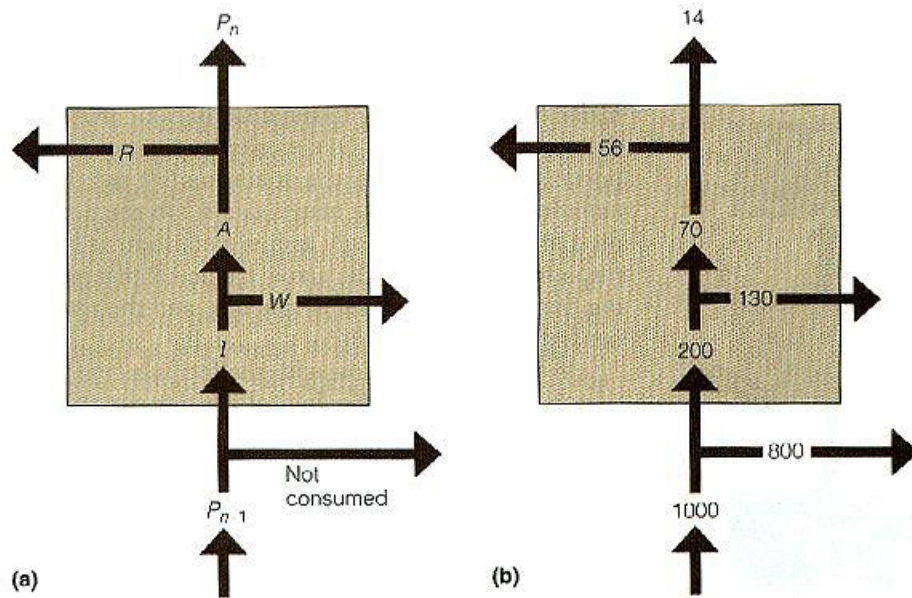


T

= 7-8 minutos

A Ecologia Trófica

Estuda as trocas de energia e matéria entre os níveis tróficos. Essas trocas obedecem às leis da termodinâmica e podem ser simuladas, por exemplo, através da moeda universal da biologia, os átomos de carbono.



Invertebrate herbivore efficiencies
 $I/P_{n-1} = 20\%$
 $A/I = 35\%$
 $P_n/A = 20\%$
 $W = \text{Waste}$
 $R = \text{Respiration}$

Figure 24.7 (a) Energy flow within a single trophic compartment. (b) A quantified example of energy flow through that compartment for an invertebrate herbivore. Values are kcal.

$$\frac{dP}{dt} = (G_p - D_p) \cdot P$$

$$\frac{dZ}{dt} = G_z \cdot Z - D_z \cdot Z$$

Cinética de Michaelis Menten e Monod

Os sistemas biológicos normalmente são sistemas que respondem de forma não linear aos fatores ambientais

Ganho de biomassa (algas)

$$G_P = K_P(T) \cdot r(I) \cdot \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{(K_{mi} + C_i)} \right) \right)$$

$$G_P = \mu \cdot \theta^{T-T_{opt}} \cdot \frac{I}{KI+I} \cdot \frac{PO_4}{KPO_4+PO_4}$$

Perda de biomassa (algas)

$$D_P = RESP \cdot \theta^{T-T_{opt}} + SED + Z \cdot GRAZ \cdot \frac{1}{KP+P}$$

Perda de biomassa (consumidores)

$$G_Z = B(T) \cdot f(P) \cdot A(P)$$

$$G_Z = GRAZ \cdot \frac{P}{KP+P} \cdot ASS$$

Perda de biomassa (consumidores)

$$D_Z = RESP \cdot \theta^{T-T_{opt}} + CARN$$

Variáveis de Estado

Disponibilidade de fósforo (1), biomassa de algas (2) e de consumidores (3)

(1)

$$\frac{dPO_4}{dt} = FLOWIN - CONV * P * \mu * \theta^{T-T_{opt}} * \left(\frac{I}{KI+I} * \frac{PO_4}{KPO_4 + PO_4} - FLOWOT + FRCYCP + FRCYCZ \right)$$

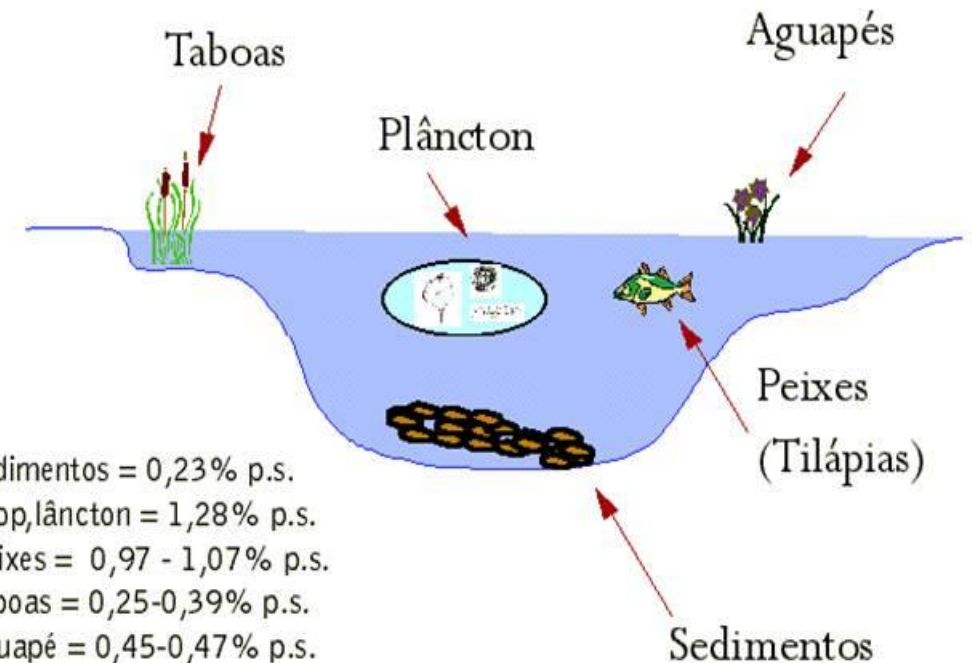
(2)

$$\frac{dP}{dt} = P * \mu * \theta^{T-T_{opt}} * \frac{I}{KI+I} * \frac{PO_4}{KPO_4 + PO_4} - P * RESP * \theta^{(T-T_{opt})} - P * SED - Z * GRAZ * \frac{P}{KP+P} - FOUTP$$

(3)

$$\frac{dZ}{dt} = Z * GRAZ * \frac{P}{KOP + P} * ASS - Z * RESP * \theta^{T-T_{opt}} - Z * CARN - FOUTZ$$

Compartimentação (biótica) do fósforo na Pampulha



P-sedimentos = 0,23% p.s.
 P-zoop,lâncton = 1,28% p.s.
 P-peixes = 0,97 - 1,07% p.s.
 P-taboas = 0,25-0,39% p.s.
 P-aguapé = 0,45-0,47% p.s.
 P-água = 300-600 mg.m3 P-P04
 p.s. = peso seco.

Funções de Força

radiação solar e temperatura da água

$$IR = 0.2 * K1 - K2 * \cos \frac{2 * \Pi * (t+15)}{365}$$

$$T = K3 - K4 * \cos \frac{(2 * \Pi * (t-30))}{365}$$

ARQUITETURA DO SOFTWARE

1. *Legado*

O software foi desenvolvido a partir de um programa escrito para MS-DOS, que possui um código fonte em linguagem PASCAL, que consiste no arquivo DYNAMICS.PAS. Com o objetivo de aproveitar o código fonte legado, foi escolhido os compiladores Borland Delphi que podem compilar arquivo em pascal com as devidas alterações.

2. *Compilador*

O compilador utilizado foi o Borland Delphi 7.0, que possui download gratuito. Esse compilador aceita programação orientada a objetos, o que nos facilita a divisão em módulos do programa a ser desenvolvido.

3. *Preparação do código fonte*

Utilizando o arquivo fonte legado ***Dynamics.pas*** (PASCAL), como a base para a simulação, foi criado a partir deste um novo arquivo ***ObjDynamics.pas*** (DELPHI-PASCAL), que possui estrutura orientada a objetos.

As tarefas executadas foram:

- retiradas de referências a units relativas a entradas e saídas em MS-DOS (writeln, getchar, etc)
- retirada de saídas de units de gráficos para MS-DOS (units graph, bezier, etc)
- criação de uma classe chama *TobjDynamcs*, que será o módulo de simulação
- conversão de todas as variáveis de cálculo da simulação para variáveis da classe *TobjDynamics*
- conversão das *procedures* e *functions*, para dentro da classe *TobjDynamics*
- a nova classe *TObjDynamics*, executa todos os passos de simulação internamente.

Módulo de Interface com o usuário

Função	Receber todas as entradas de usuário, via mouse e teclados e mostrar as saídas gráficas incluindo os campos de edição de parâmetros, as abas de controle, botões, e áreas de exibição de gráficos.
Arquivo Fonte	<i>MainModelo.Pas</i>
Função	Exibição dos gráficos XY de múltiplas linhas
Arquivos Fonte	<i>xyGraph.pas, xyCommom.pas, xyGraph3D,</i>
Função	Tela auxiliar para mostrar informação de ajuda
Arquivo Fonte	<i>Explanation.pas</i>

Simulação

Função	Recebe as informações que foram preenchidas no modulo de interface, e faz os cálculos
Arquivo Fonte	<i>objDynamics.pas</i>
Função	Retorna as informações de calculo para a tela gráfica
Arquivos Fonte	<i>thrdDynamics.pas</i>
Função	Guarda todas as séries temporais da simulação em vetores
Arquivo Fonte	<i>objVectors.pas</i>

Principais variáveis do modelo

Variáveis de Estado

- 1 PO4 = concentração de ortofosfato (ug/l)
- 2 P = biomassa do fitoplâncton medida em clorofila-a (ug/Chl-a.l)
- 3 Z = biomassa do zooplâncton medida em mgC/l

Constantes do Modelo

- 1 MUMAX = taxa de crescimento do fitoplâncton
- 2 KPO4 = constante de saturação para o ortofosfato
- 3 THETA = fator fisiológico de correção (Q10) para a temperatura
- 4 KI = constante de saturação para a radiação solar
- 5 TIMERET = tempo de retenção ou de renovação da água
- 6 RESP = taxa de respiração do fitoplâncton
- 7 SED = taxa de sedimentação
- 8 GRAZ = taxa de consumo de algas pelo zooplâncton (zooplankton grazing rate)
- 9 KP = constante de saturação do fitoplâncton
- 10 ASS = eficiência de assimilação (conversão de clorofila em massa de carbono do zoo)
- 11 RESZ = taxa de respiração do zooplâncton
- 12 CARN = taxa de predação do zooplâncton
- 13 FLOWIN = aporte externo de fósforo
- 14 CON = eficiência de conversão energética entre níveis tróficos

Modelo

- 1 FLOWOT := PO4/TIMERET
- 2 FGP := P*MUMAX*(EXP((T-20)*LN(THETA)))*(IR/(KI+IR))*(PO4/(KPO4+PO4))
- 3 FRESP := P*RESP*(EXP((T-20)*LN(THETA)))
- 4 FSED := P*SED
- 5 FBR := Z*GRAZ*(P/(KP+P))
- 6 FOUTP := P/TIMERET
- 7 FGZ := FBR*ASS
- 8 FRESZ := Z*RESP*(EXP((T-20)*LN(THETA)))
- 9 FPRED := Z*CARN
- 10 FOUTZ := Z/TIMERET
- 11 FCONS := CONV*FGP
- 12 FRCYCP := FRESP * CONV
- 13 FRCYCZ := FRESZ * CONV/ASS]

Constantes das variáveis de força (radiação solar e temperatura da água)

- K1 = constante para a radiação solar - I (média)
- K2 = constante para a radiação solar - II (amplitude)
- K3 = constante para a temperatura da água - I (média)
- K4 = constante para a temperatura da água - II (amplitude)
- MaxTime = tempo máximo das simulações em dias
- Cont = tempo de duração de cada ciclo (gap in days)

Configuração do início da simulação

(variáveis de estado):

Tipo de ambiente= Lago Tropical

PO40 = 40.000 P0 = 3.000 Z0 = 0.015 C0 = 0.009

Parâmetros

MUMAX = 2.100 KPO4 = 8.000 THETA = 1.700 KI = 0.040

TIMERET = 200.000 RESP = 0.250 SED = 0.060 GRAZ = 19.000

GRAZ2 = 11.000 KP = 15.000 ASS = 0.015 RESZ = 0.150

CARN = 0.016 FLOWIN = 0.440 CONV = 0.680 CARN2 = 0.005

KZ = 0.047 ASSCARN = 1.000 RESCARN = 0.005

Entrada (Variáveis de Força) - Constantes

K1 = 0.300 K2 = 0.020 K3 = 24.000 K4 = 2.000

TMax = 26.000 ESC_RANDOM = 0

Outras constantes

MaxTime = 1825 Cont = 14

Número de ciclos/interações = 130

Min_Y1 = 0.0000 Max_Y1 = 60.0000

Min_Y2 = 0.0000 Max_Y2 = 50.0000

Min_Y3 = 0.0000 Max_Y3 = 0.5000

Tipo de simulação

Flowin_Simula_Bol = TRUE TimeRet_Simula_Bol = FALSE

Carn_Simula_Bol = FALSE Graz_Simula_Bol = FALSE

RICARDO MOTTA PINTO-COELHO, RAQUEL TEIXERA DE MOURA and ANDREA MOREIRA

Depto. Biologia Geral, ICB, UFMG, Belo Horizonte, Brazil.

Zooplankton and Bacteria Contribution to Phosphorus and Nitrogen Internal Cycling in a Tropical and Eutrophic Reservoir: Pampulha Lake, Brazil

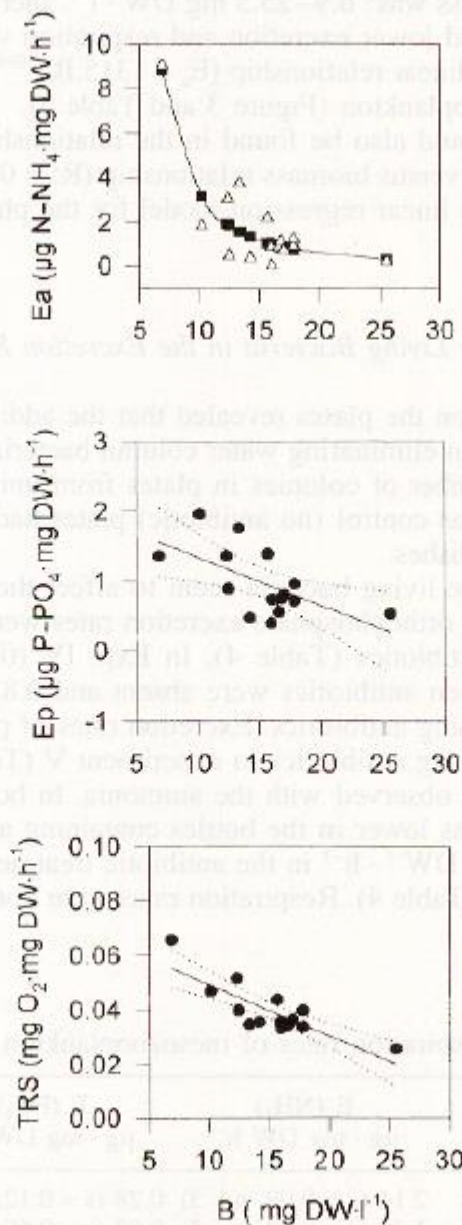
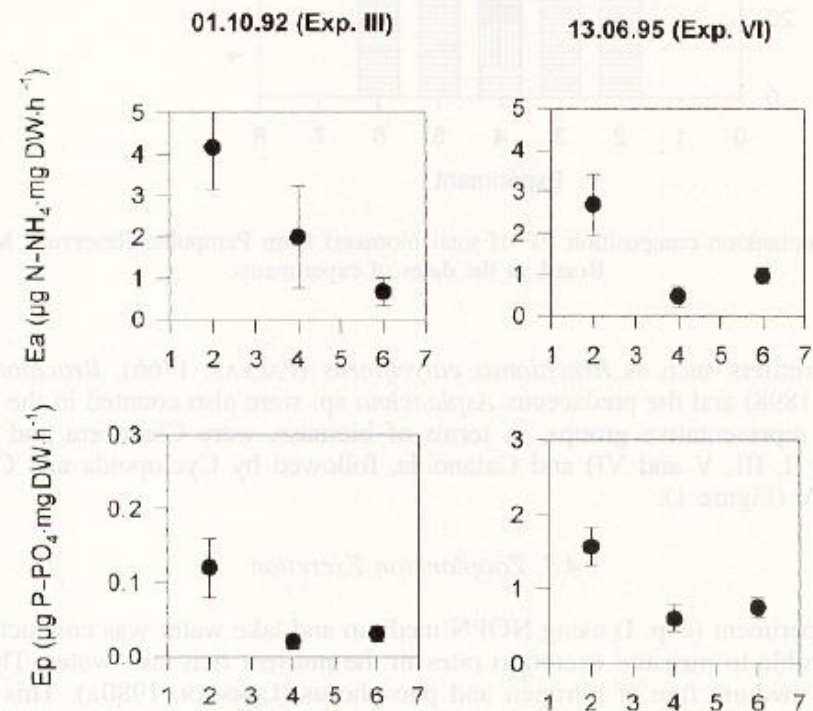


Figure 3. Scatter diagrams showing excretion (E_a and E_p) and respiration (TRS) rates plotted against biomass of zooplankton (data from experiment VI). Dotted lines in regressions: 95% confidence intervals.



Lagos Temperados



Lake Konstanz, Überlingersse

SettingsType of Lake Temperate[Help](#)**Initial Settings for State Variables**PO40 p0 z0 c0 **Parameters**MUMAX KPO4 Theta KI RetTime Resp Sed Graz Graz2 KP AssimEff ResZ Carn FlowIn Conv Carn2 KZ AssimCarn ResCarn **Input (Force) variable constants**K1 K2 K3 K4 TMax Esc Random **Other Constant**Max Time Number of cycles/interactions Min Y1 Max Y1 Min Y2 Max Y2 Min Y3 Max Y3 **Type Of Simulation** Simulate FlowIn Simulate RetTime Simulate Carn Simulate Graz

Graphic 1 PO4 fosfate



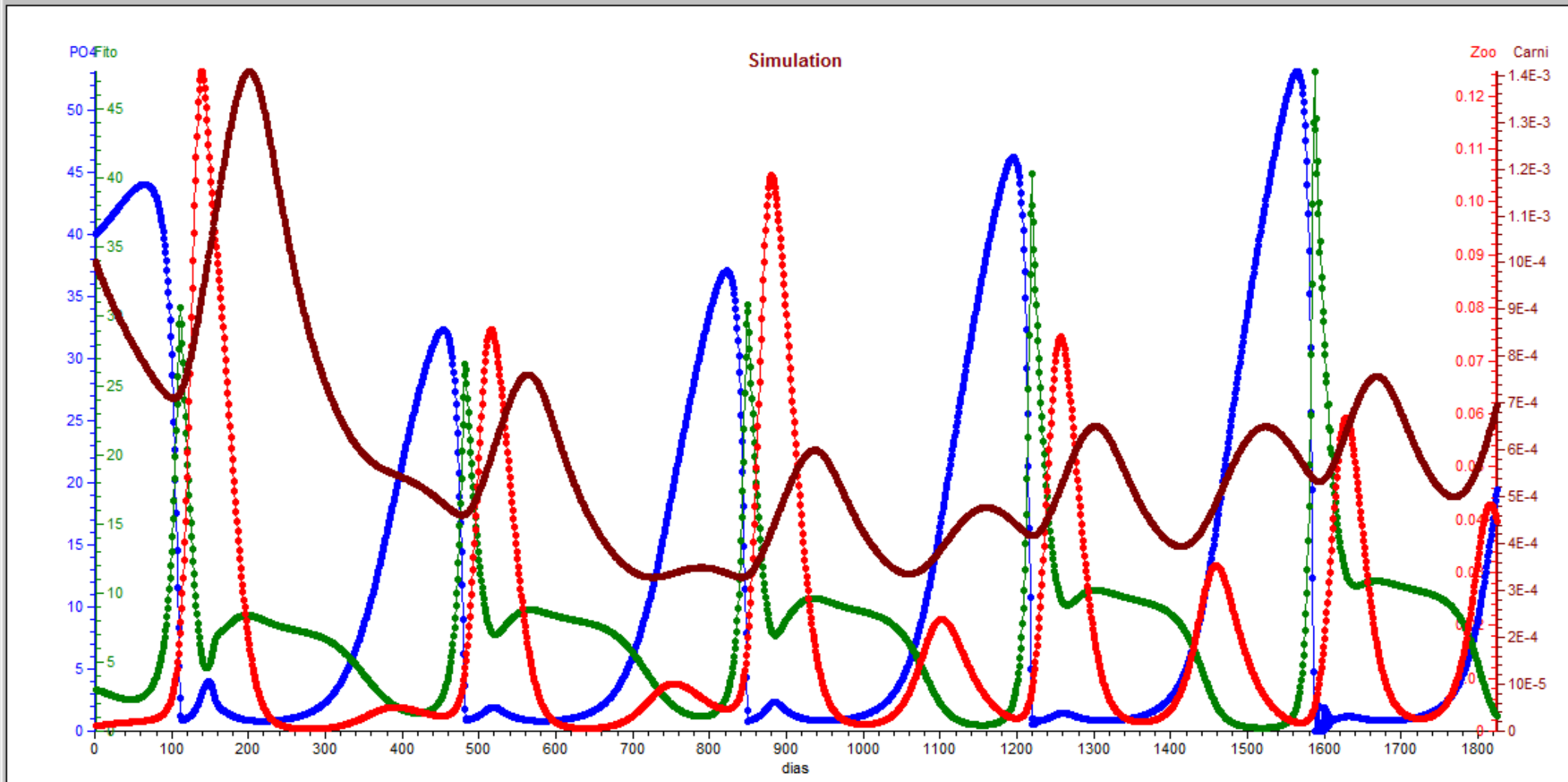
Graphic 3 ZooPlancton

 Only Lines

Graphic 2 FitoPlancton



Graphic 4 Carnivore



Ambiente Tropical

A wide-angle photograph of Lagoa da Pampulha in Belo Horizonte, Brazil. The foreground is dominated by the calm, blue water of the lake. In the middle ground, a lush green shoreline is dotted with various trees, including several tall palm trees. In the background, a city skyline is visible, with several high-rise buildings rising above the trees. The sky is a clear, bright blue, filled with soft, white cumulus clouds. The overall atmosphere is serene and tropical.

Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte

Settings

Type of Lake Tropical

Help

Initial Settings for State Variables

PO40 40.000p0 3.000z0 0.015c0 0.009

Parameters

MUMAX 2.100KPO4 8.000Theta 1.700KI 0.040RetTime 200.000Resp 0.250Sed 0.060Graz 19.000Graz2 11.000KP 15.000AssimEff 0.015ResZ 0.150Carn 0.017FlowIn 0.440Conv 0.680Carn2 0.006KZ 0.047AssimCarn 1.000ResCarn 0.005

Input (Force) variable constants

K1 0.300K2 0.020K3 24.000K4 2.000TMax 26.000Esc Random 0

Other Constant

Max Time 1825Number of cycles/interactions 1Min Y1 0.0000Max Y1 60.0000Min Y2 0.0000Max Y2 50.0000Min Y3 0.0000Max Y3 0.5000

Type Of Simulation

 Simulate FlowIn Simulate RetTime Simulate Carn Simulate Graz

Graphic 1 PO4 fosfate



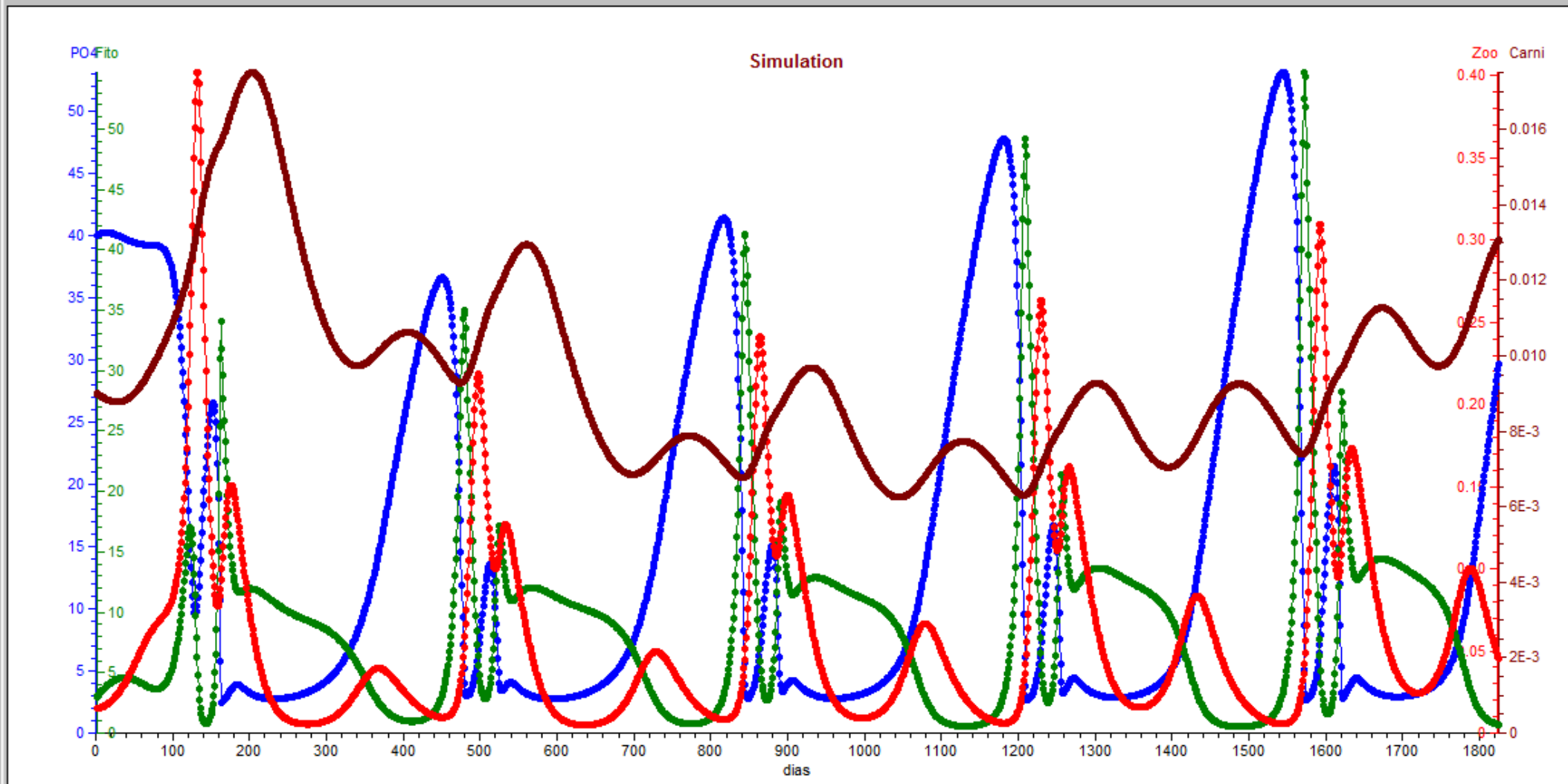
Graphic 3 ZooPlancton

 Only Lines

Graphic 2 FitoPlancton



Graphic 4 Carnivore



Endereço

Área de Trabalho

Bibli

Ricar

13:25

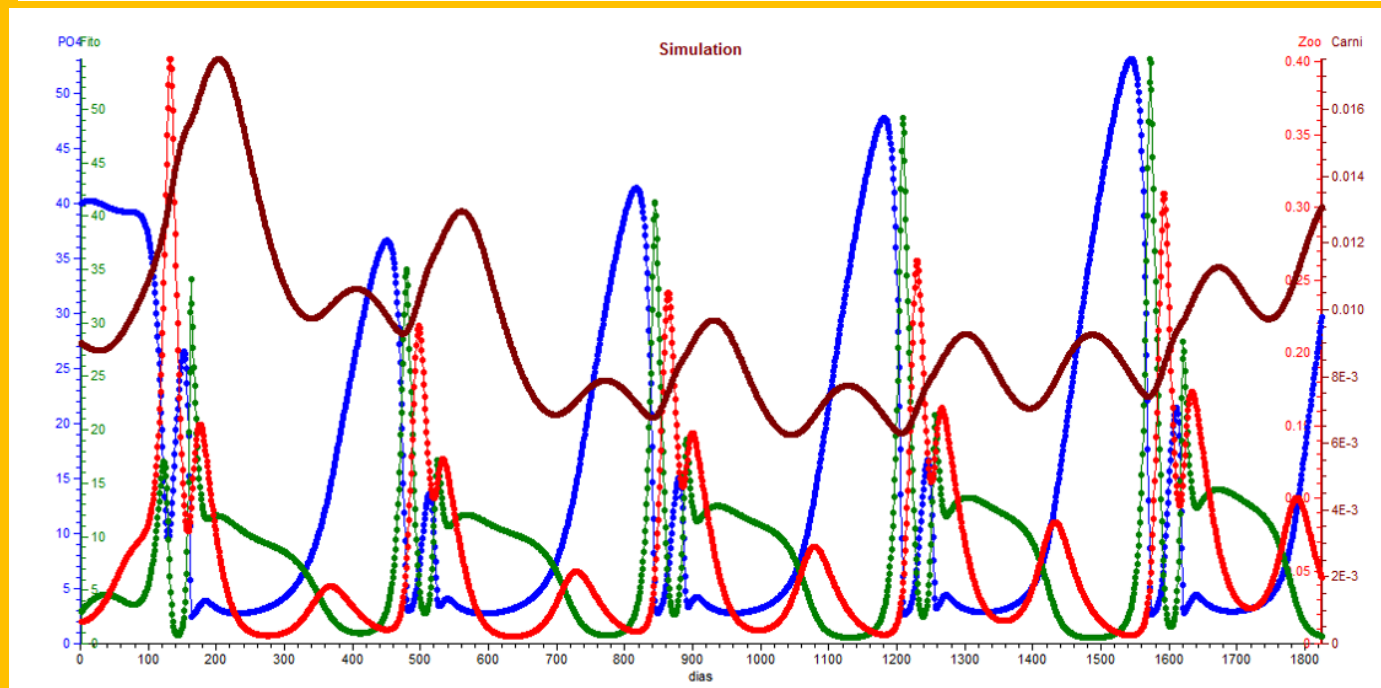
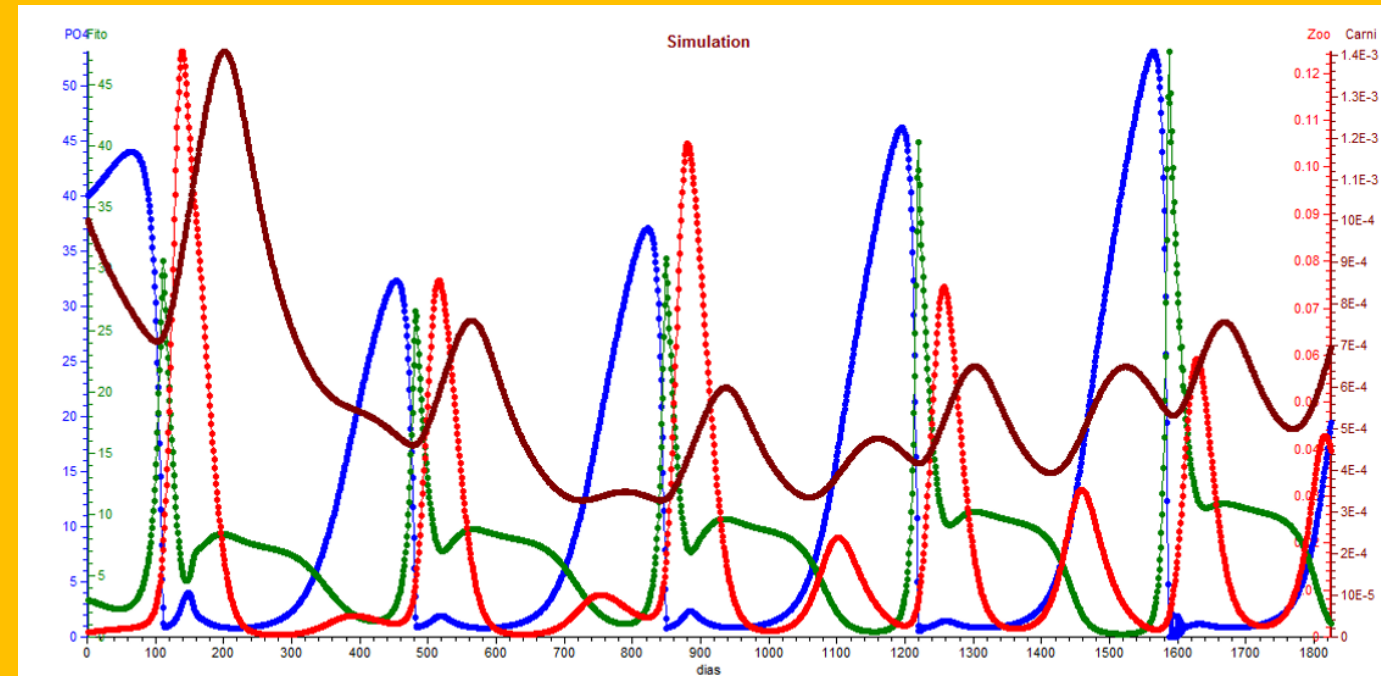
sábado

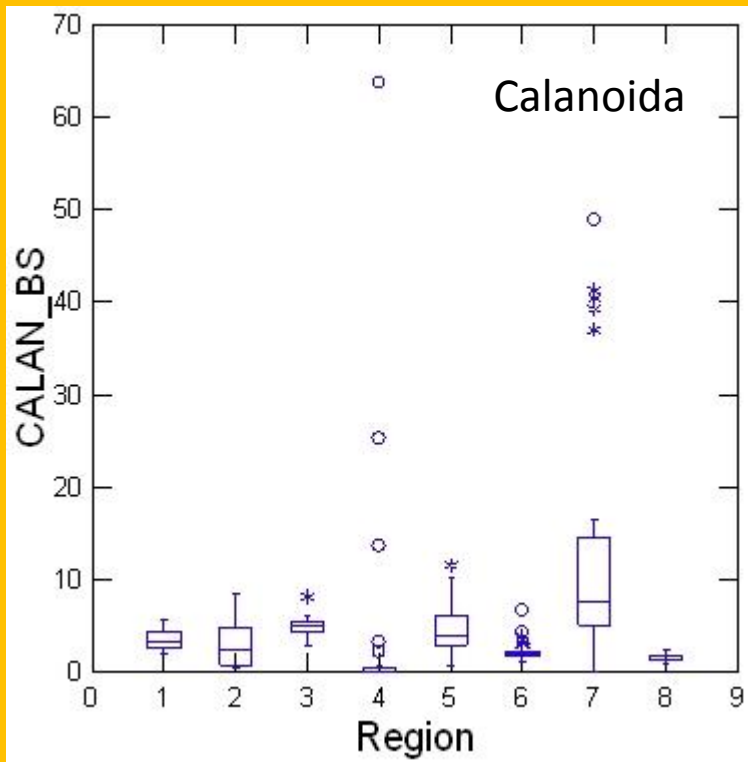
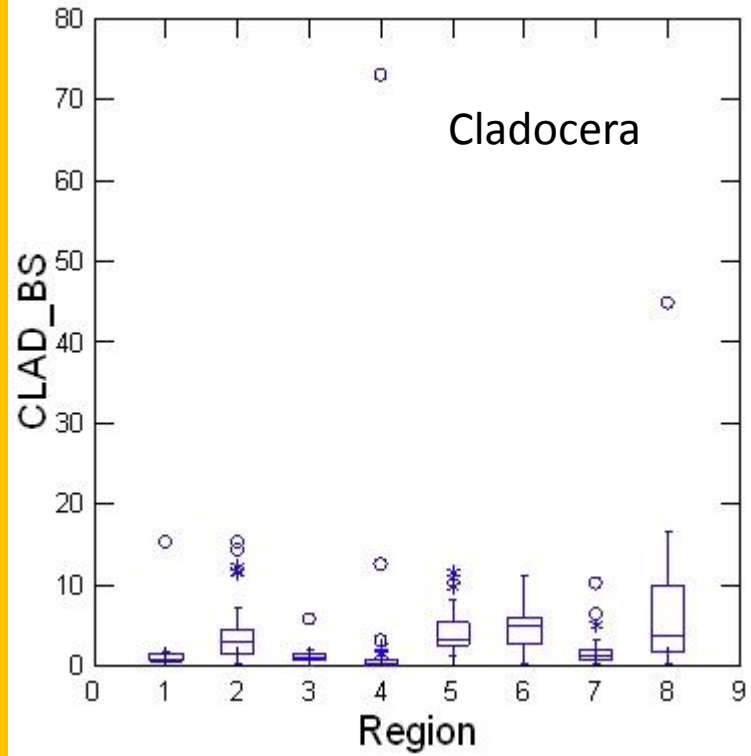
12/10/2013

Aplicações do Modelo (I)

O modelo aqui apresentado foi aplicado a duas situações distintas, a saber, um lago tropical e um lago temperado. As constantes foram alteradas para que sejam aquelas mais aproximadas de cada ambiente em questão. Por exemplo, a temperatura máxima passou de 20°C no sistema temperado para 26°C no tropical. As taxas de crescimento do fitoplâncton, de herbivoria, de respiração e sedimentação foram elevadas no sistema tropical para compensar esse aumento da temperatura que afeta todo o metabolismo dos organismos (Q_{10}).

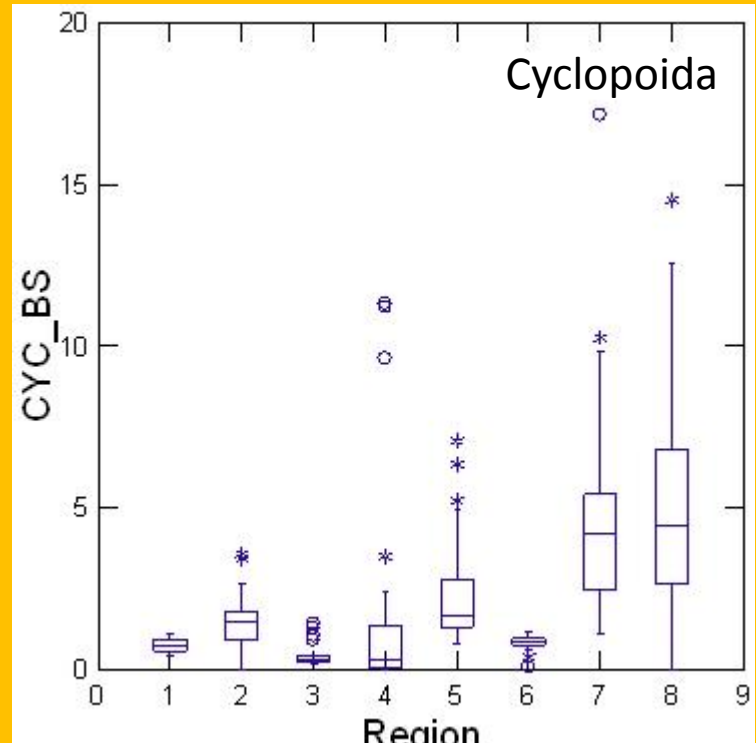
As simulações mostram duas diferenças muito importantes: (a) o sistema tropical é mais instável do que o temperado já que apresenta bruscas oscilações nas biomassas dos organismos produtores e consumidores; (b) a biomassa do zooplâncton é menor no sistema tropical.





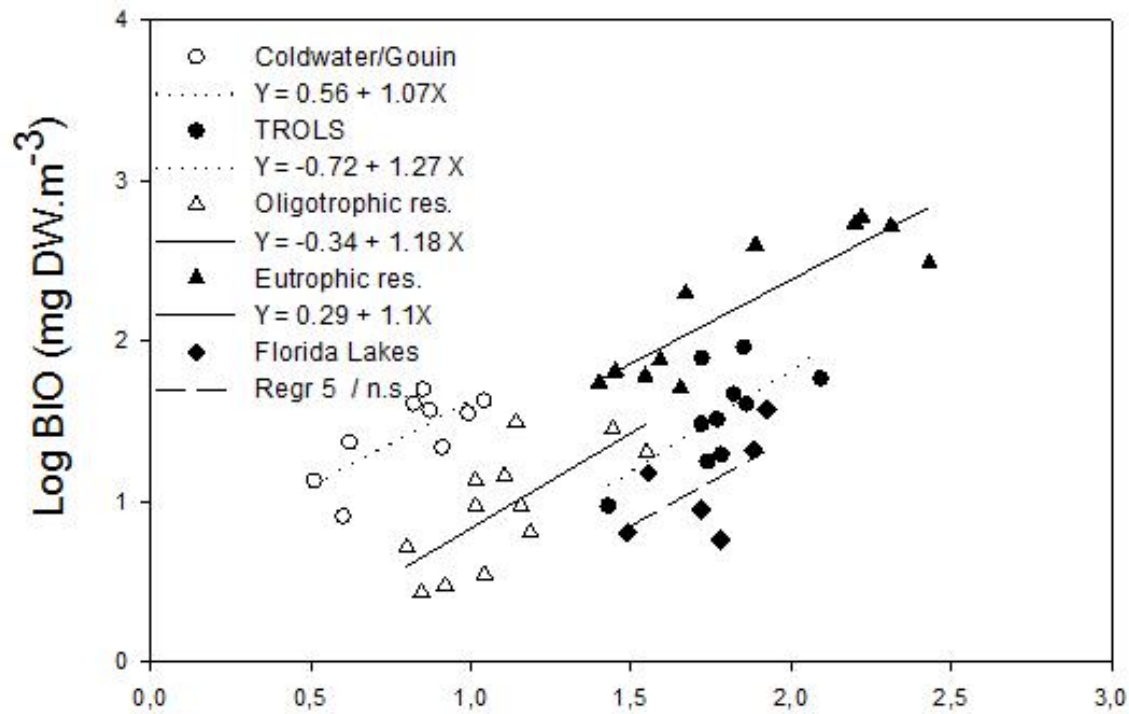
Region 7 (Alaska)
Lakes Parkers and Hidden included
Region 2 (Brazil)
Ibirité and Furnas included

Region
Etiopia
Brazil
Florida
Turkey
British Columbia, CA
Coldwater
Alaska

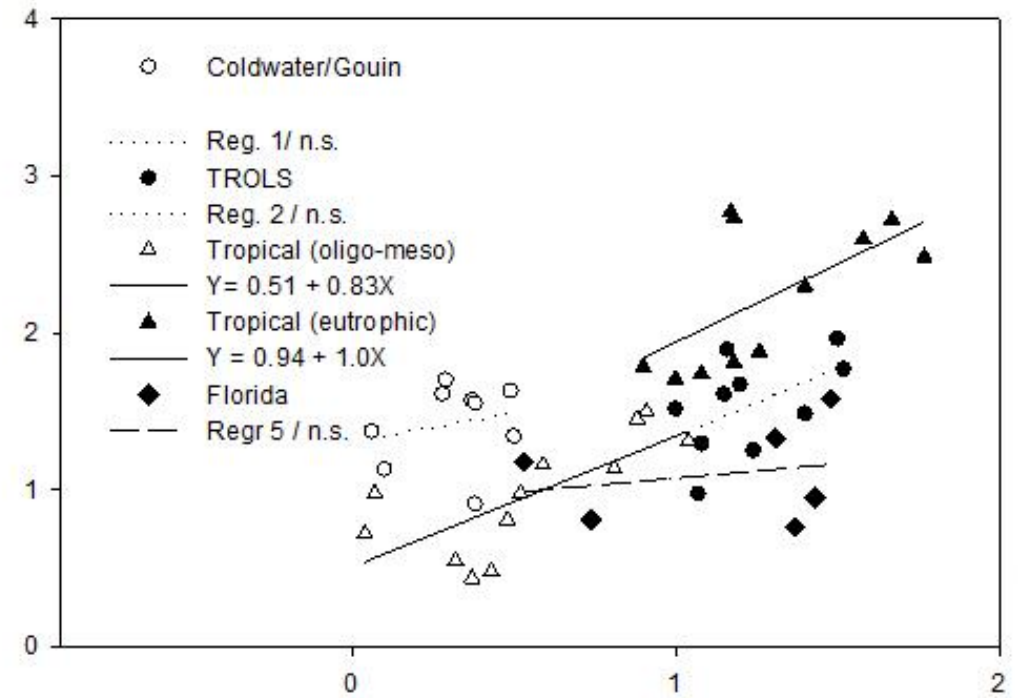


O elemento fósforo (P)

é reconhecido como um elemento limitante para a produção primária e secundária na maioria dos lagos e reservatórios sejam eles temperados e tropicais. A biomassa do zooplâncton aumenta em função de aumentos tanto do fósforo quanto da clorofila-a em uma grande variedade de lagos em diversas latitudes do planeta.



Log TP (mg.m⁻³)



Log Clorofila-a (mg.m⁻³)

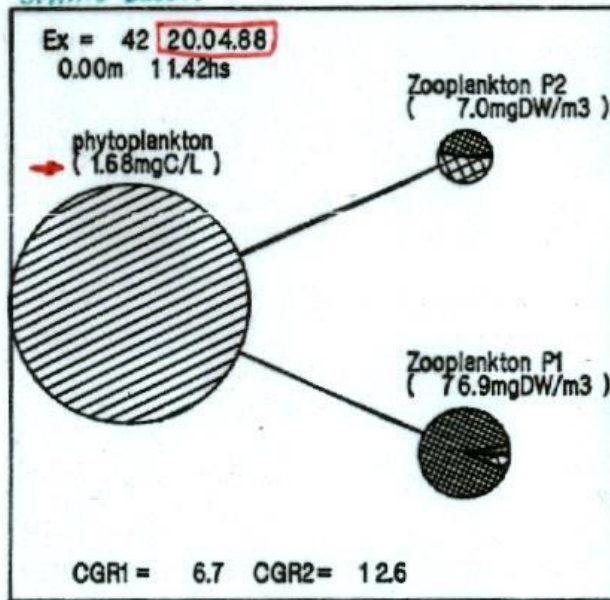
O zooplâncton possui a capacidade de – em poucos dias – de filtrar quase que a totalidade de algas presentes no fitoplâncton de lagos, reservatórios e oceanos. O fenômeno “clear water phase” típico de muitos lagos europeus e americanos é causado por um abrupto aumento da transparência da água causada pelo consumo das algas presentes na coluna de água pelos organismos do zooplâncton.



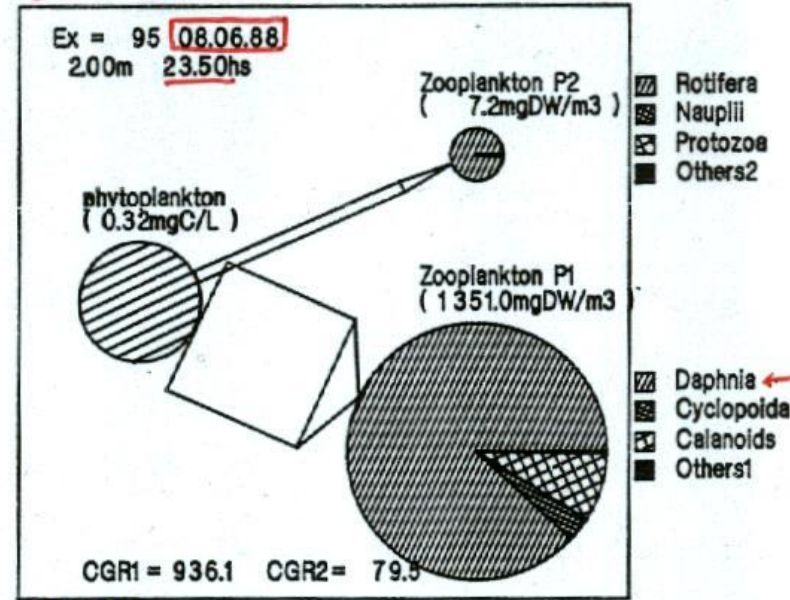
LAKE CONSTANCE (ÜBERLINGERSEE) 1988

Pinto-Coelho (199)

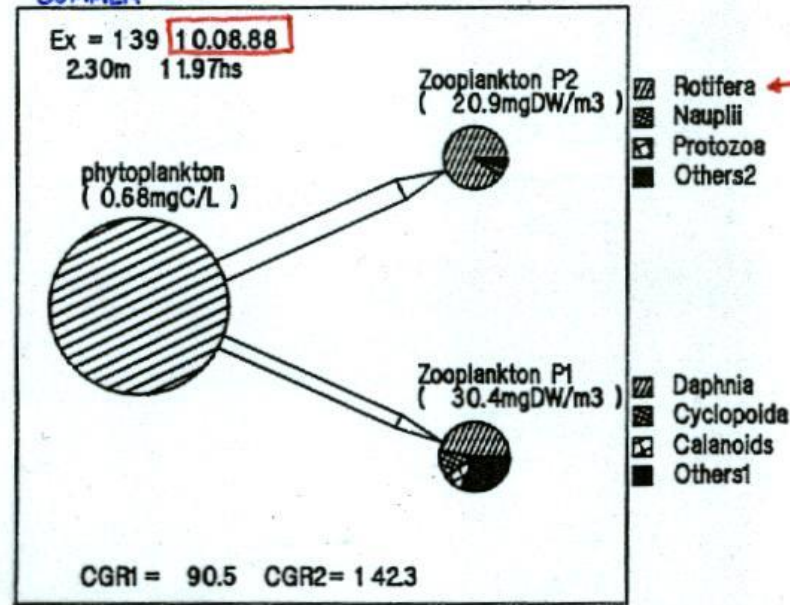
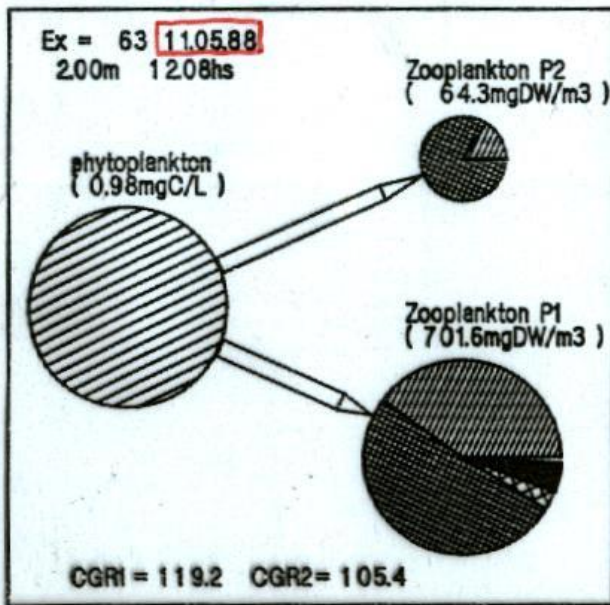
SPRING BLOOM



CLEAR-WATER



SUMMER



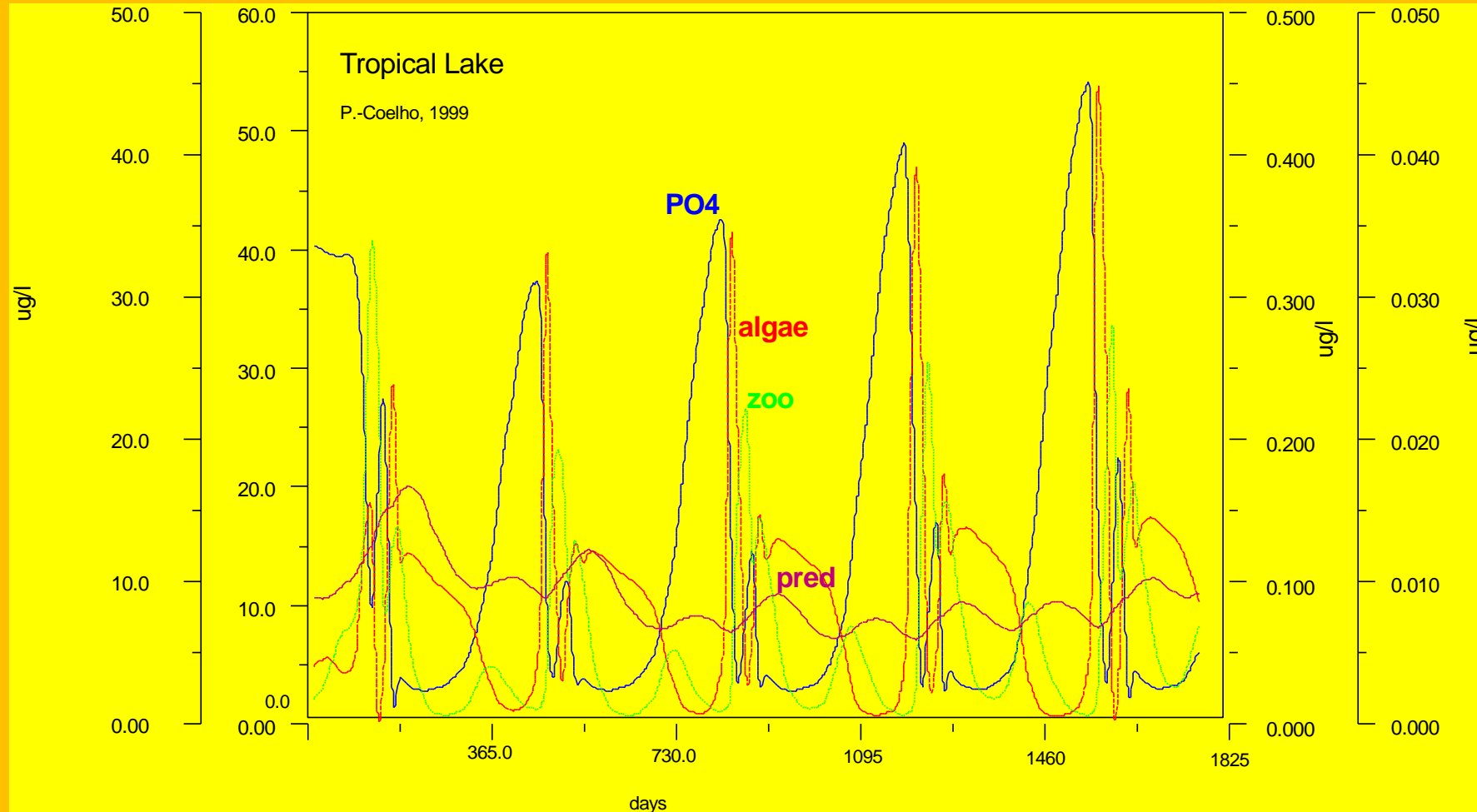
Aplicações do Modelo (II)

A capacidade de suporte um reservatório pode ser estimada, por exemplo, através da concentração de clorofila-a obtida pelo modelo que é função de uma série de variáveis de força e outros parâmetros importantes tais como a taxa de herbivoria ou a taxa de sedimentação.

A seguir, iremos simular o comportamento de algumas variáveis que consideramos são de importância para a delimitação dos parques aquícolas:

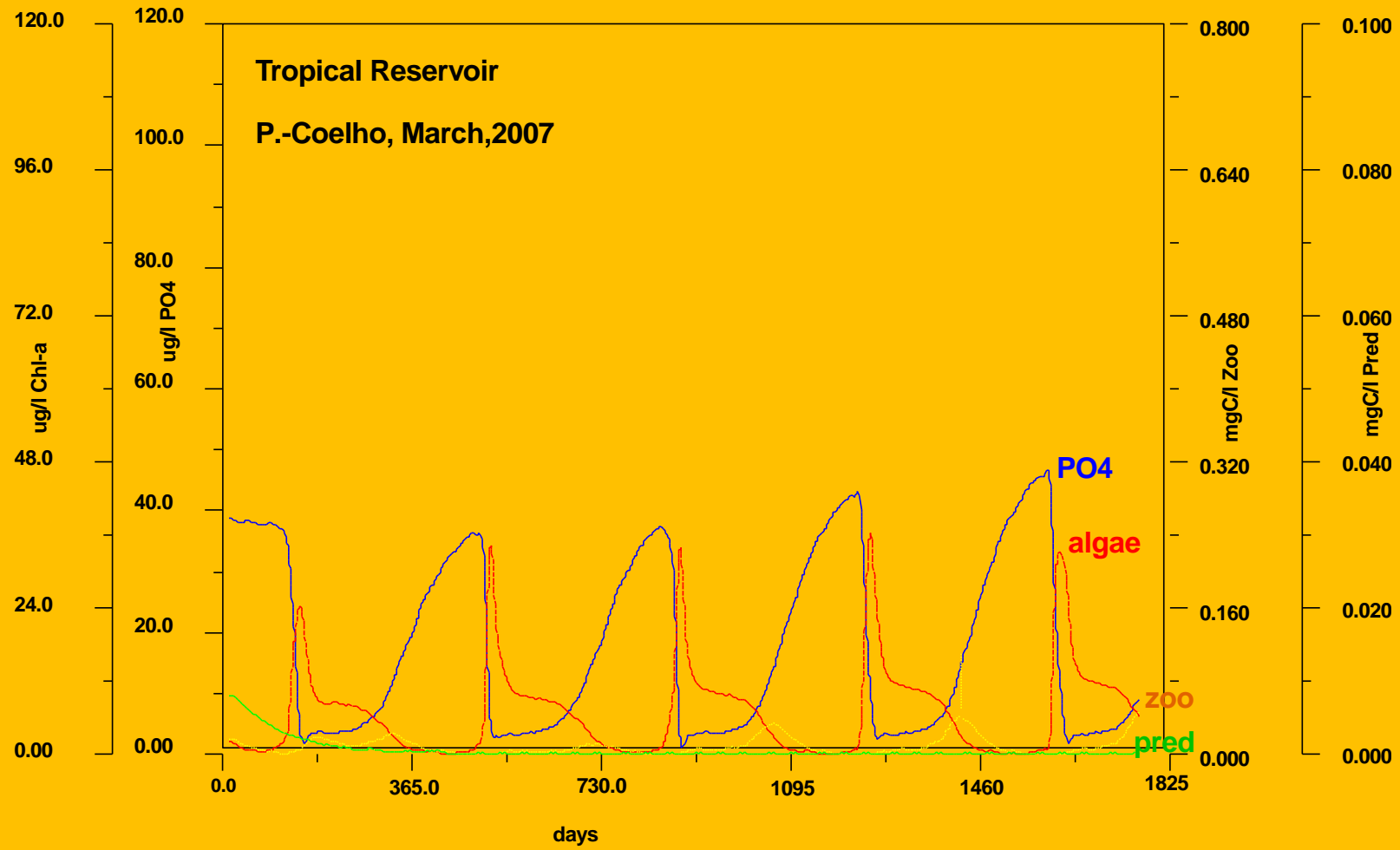
- a) Aporte externo de fósforo
- b) Tempo de retenção
- c) Temperatura média e máxima da água
- d) Taxa de sedimentação

O aumento do aporte de fósforo causa a eutrofização dos lagos e reservatórios

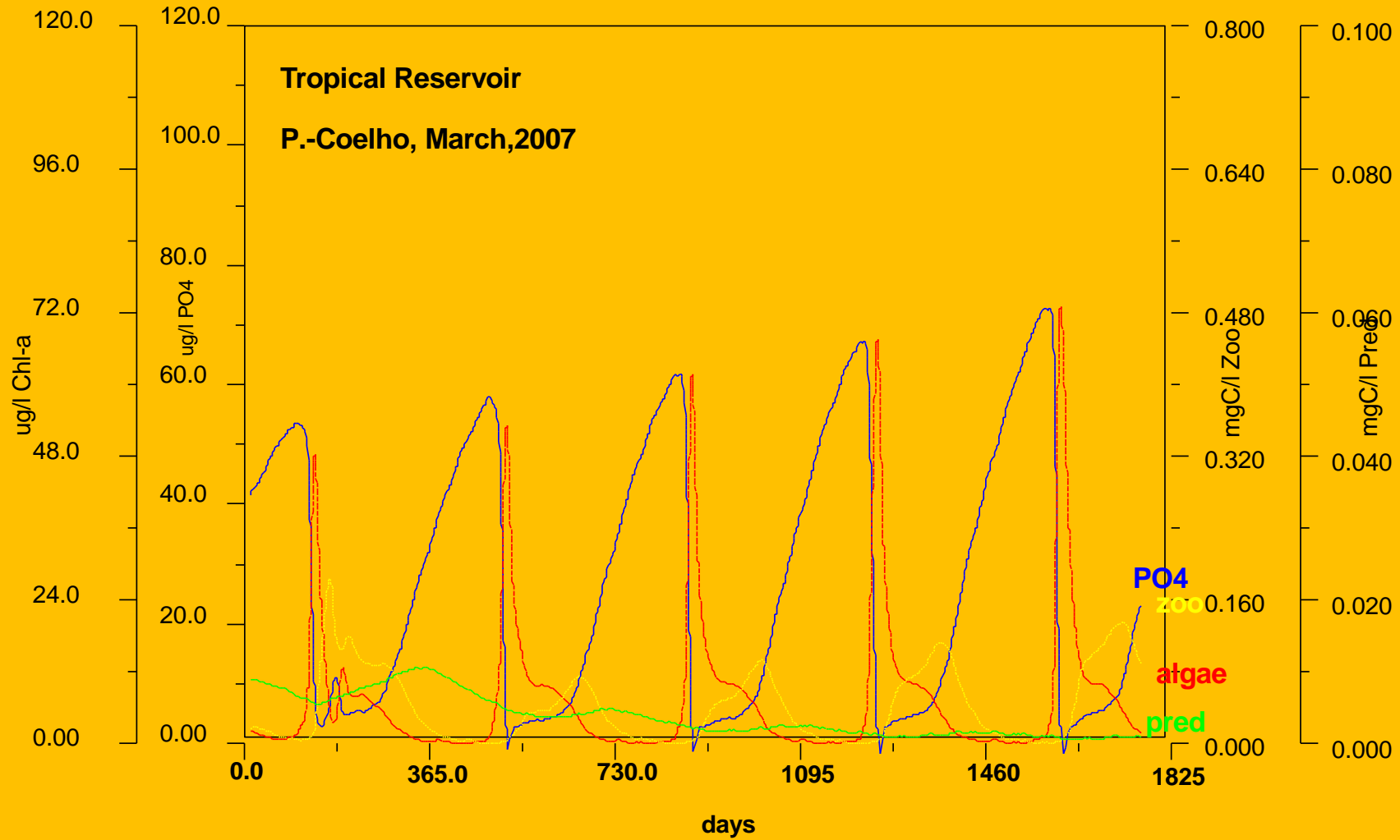


Simulações mostrando os efeitos de um aumento continuado no aporte de fósforo num período de 5 anos

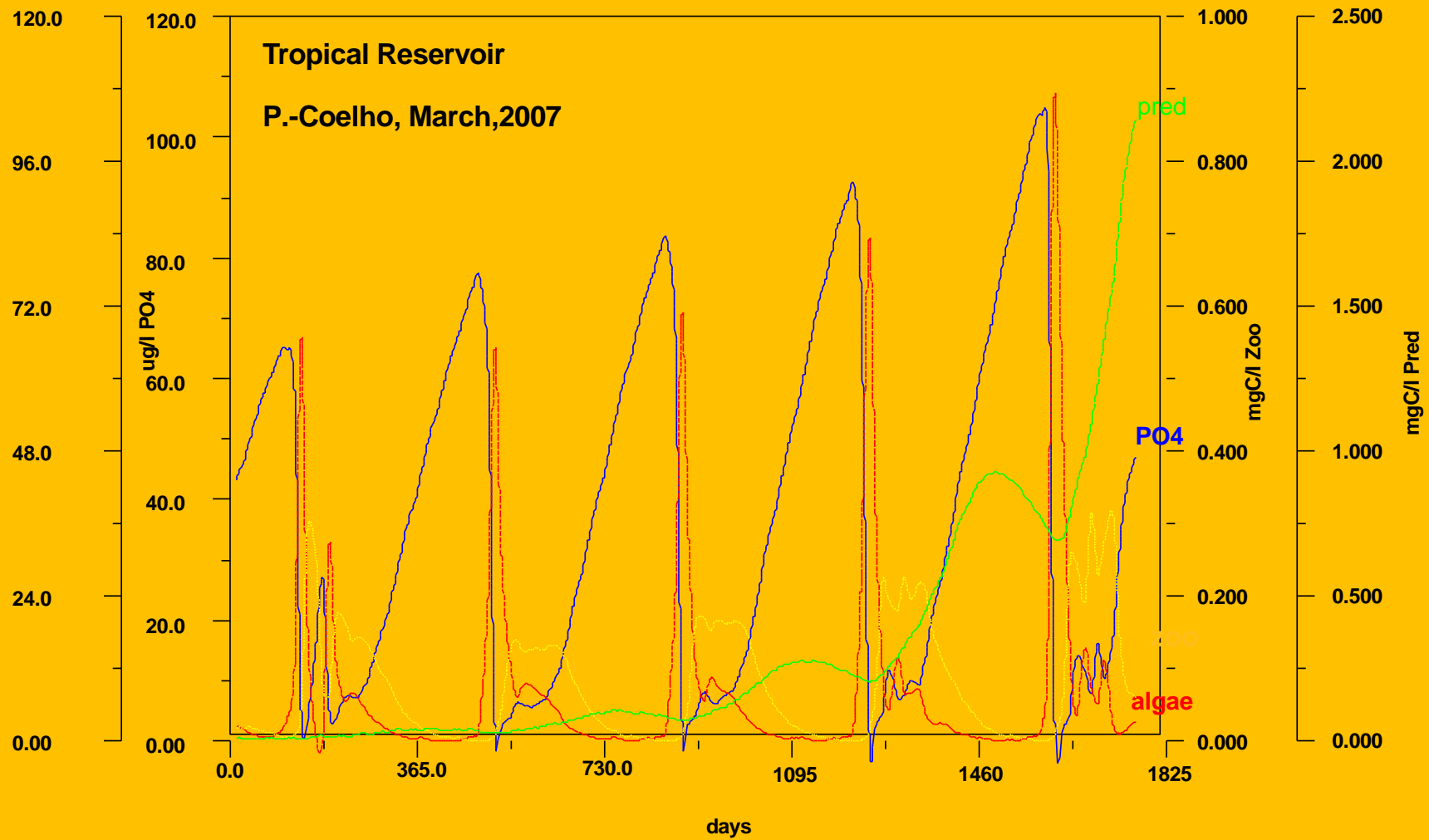
Tempo de Retenção



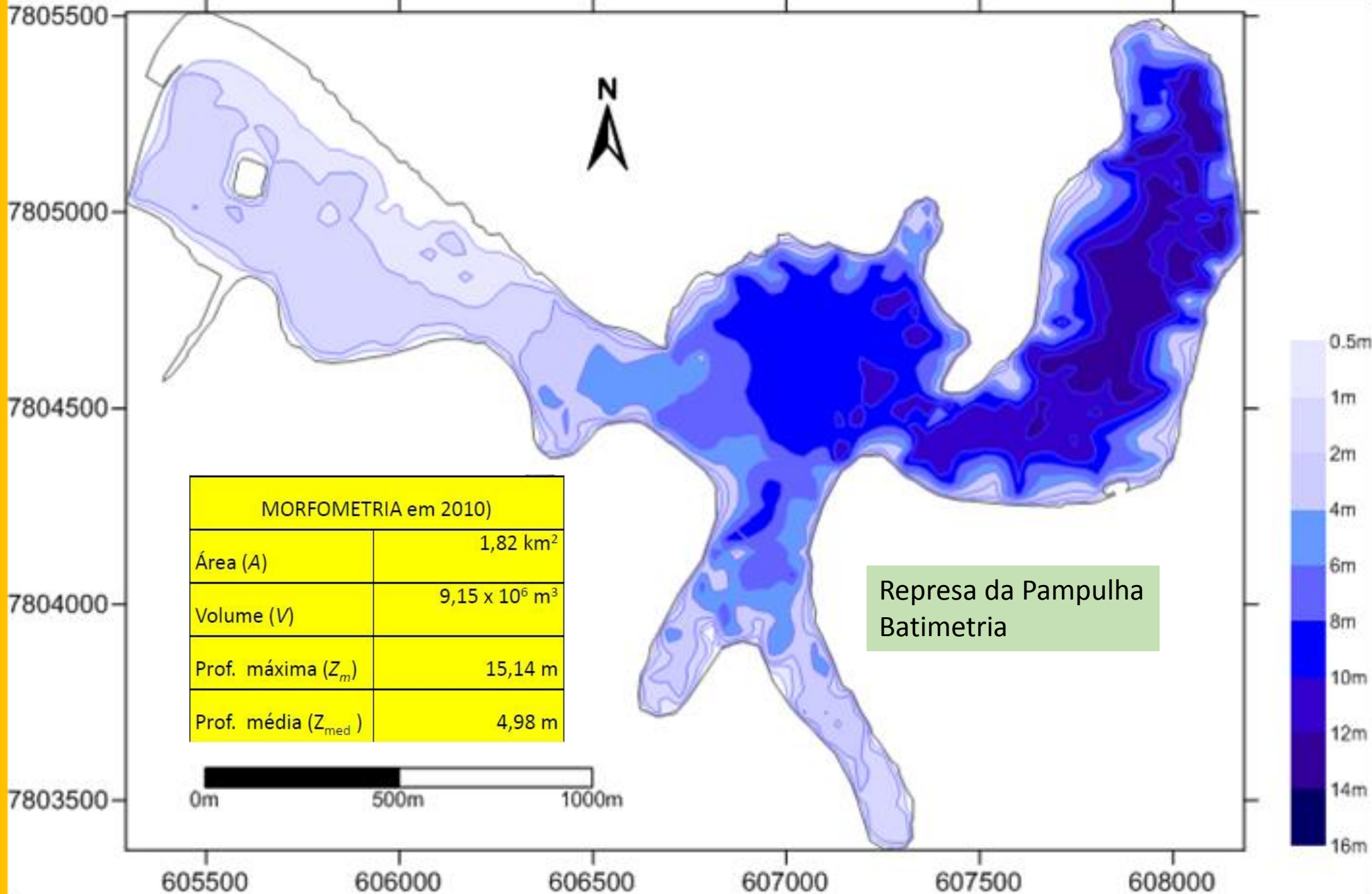
Timeret = 90

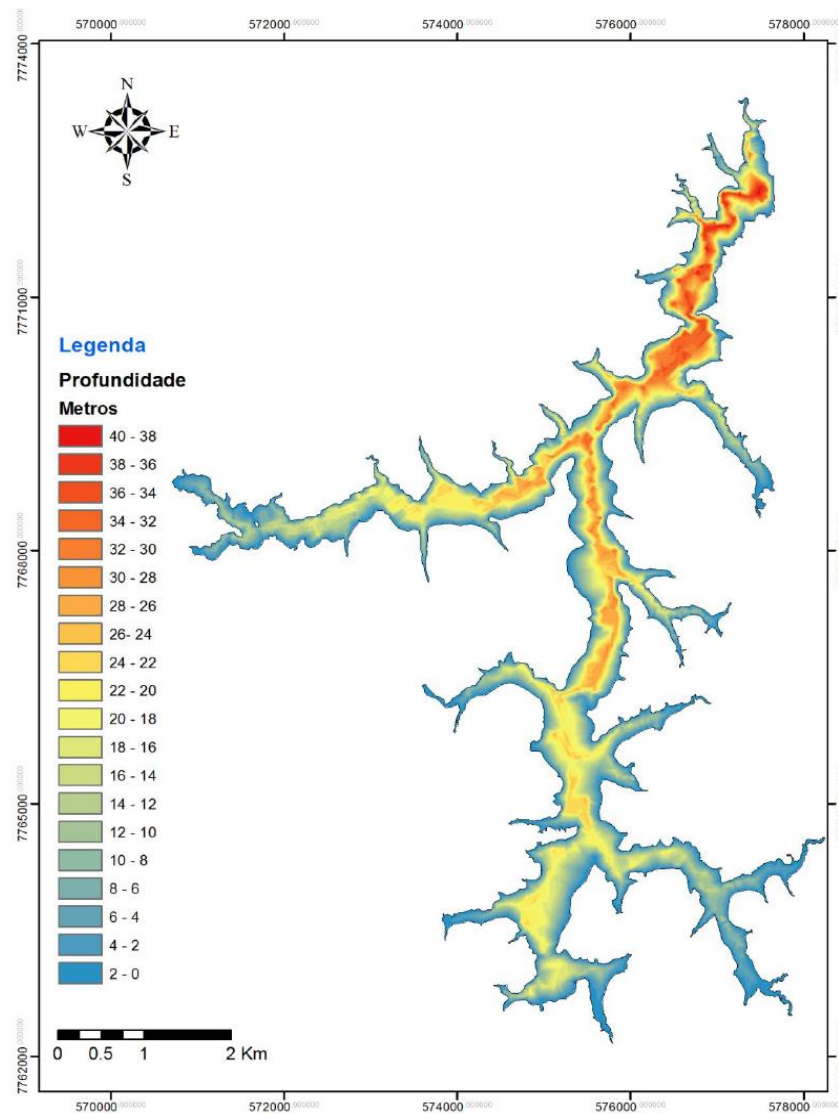


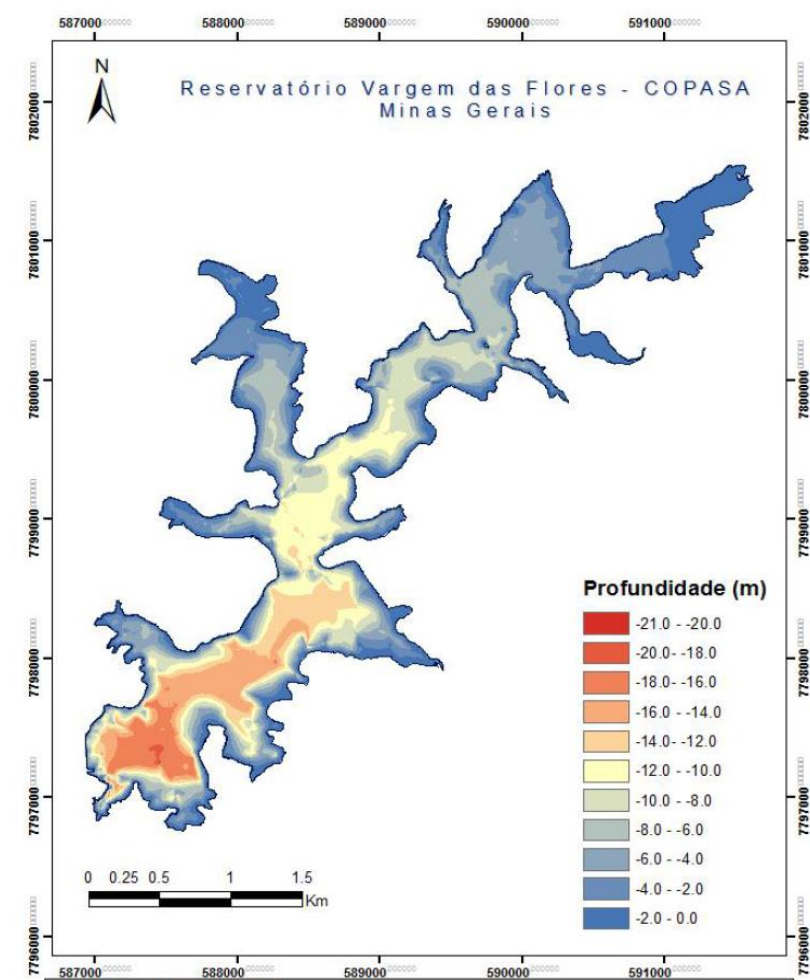
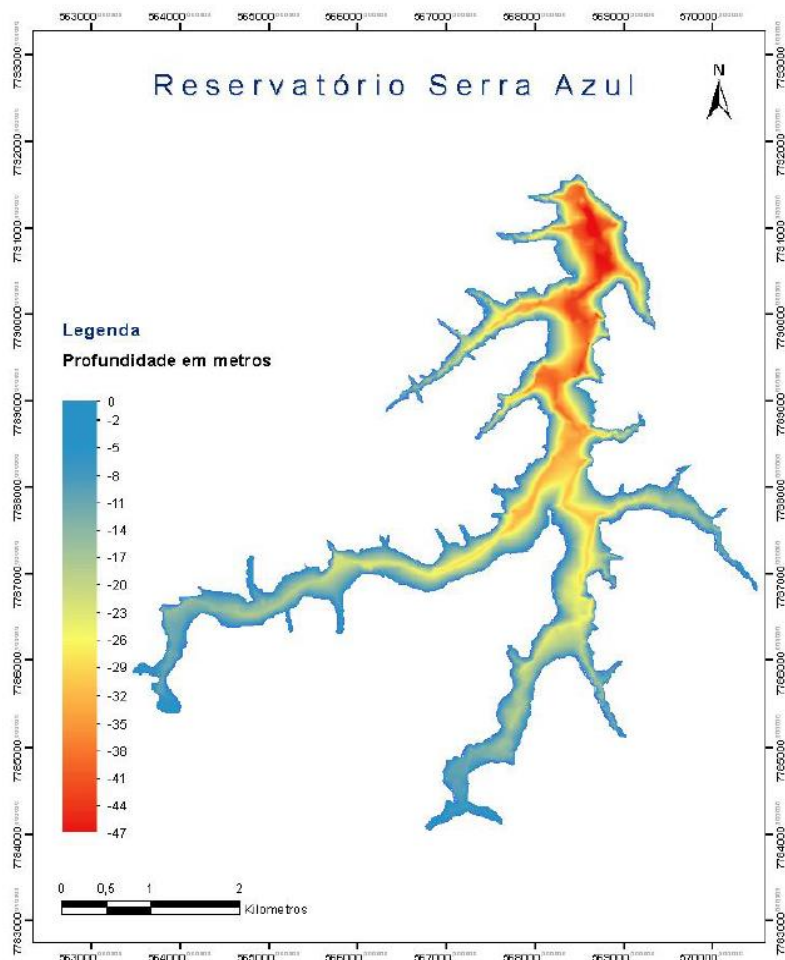
Timeret = 180

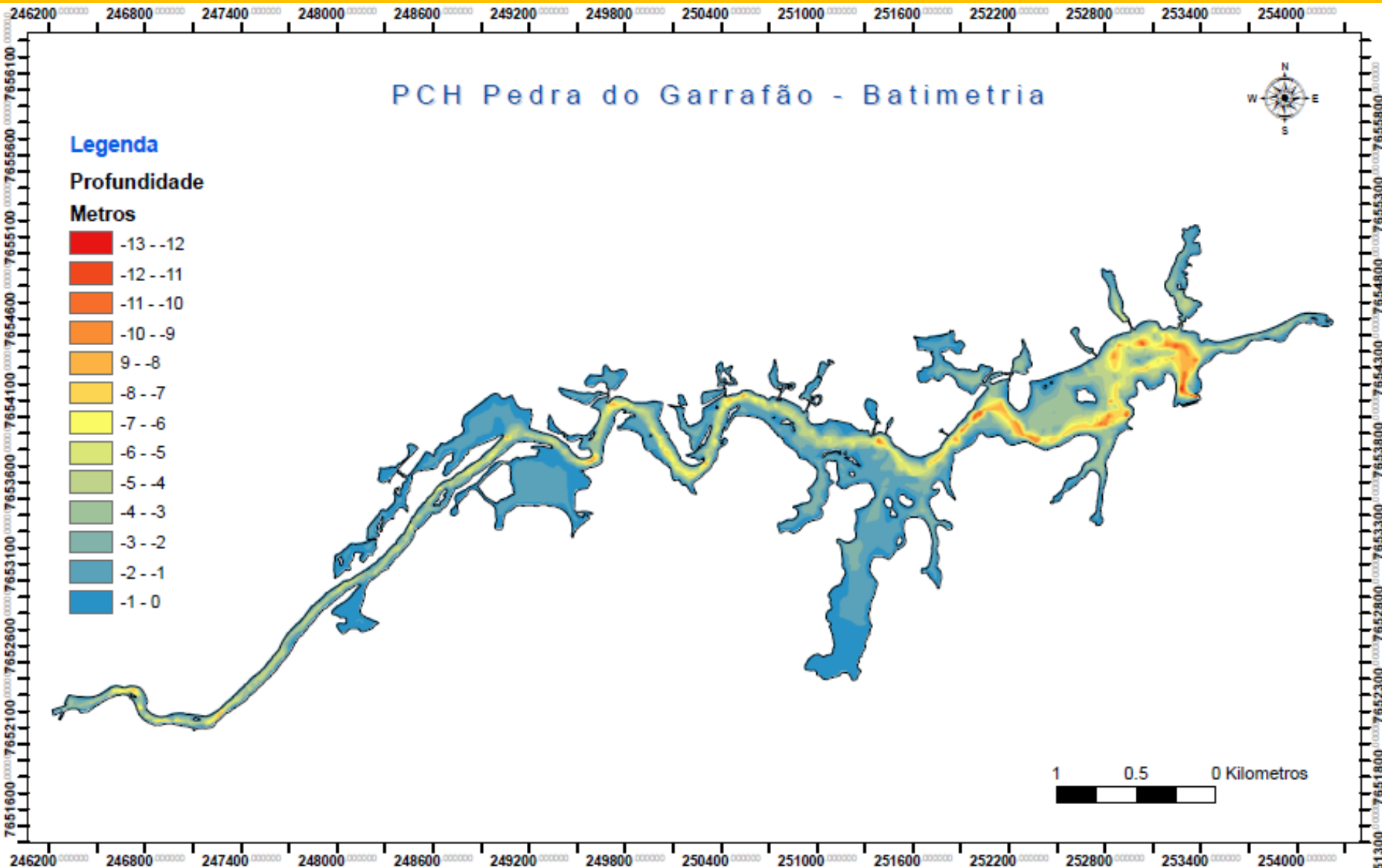


Timeret = 360



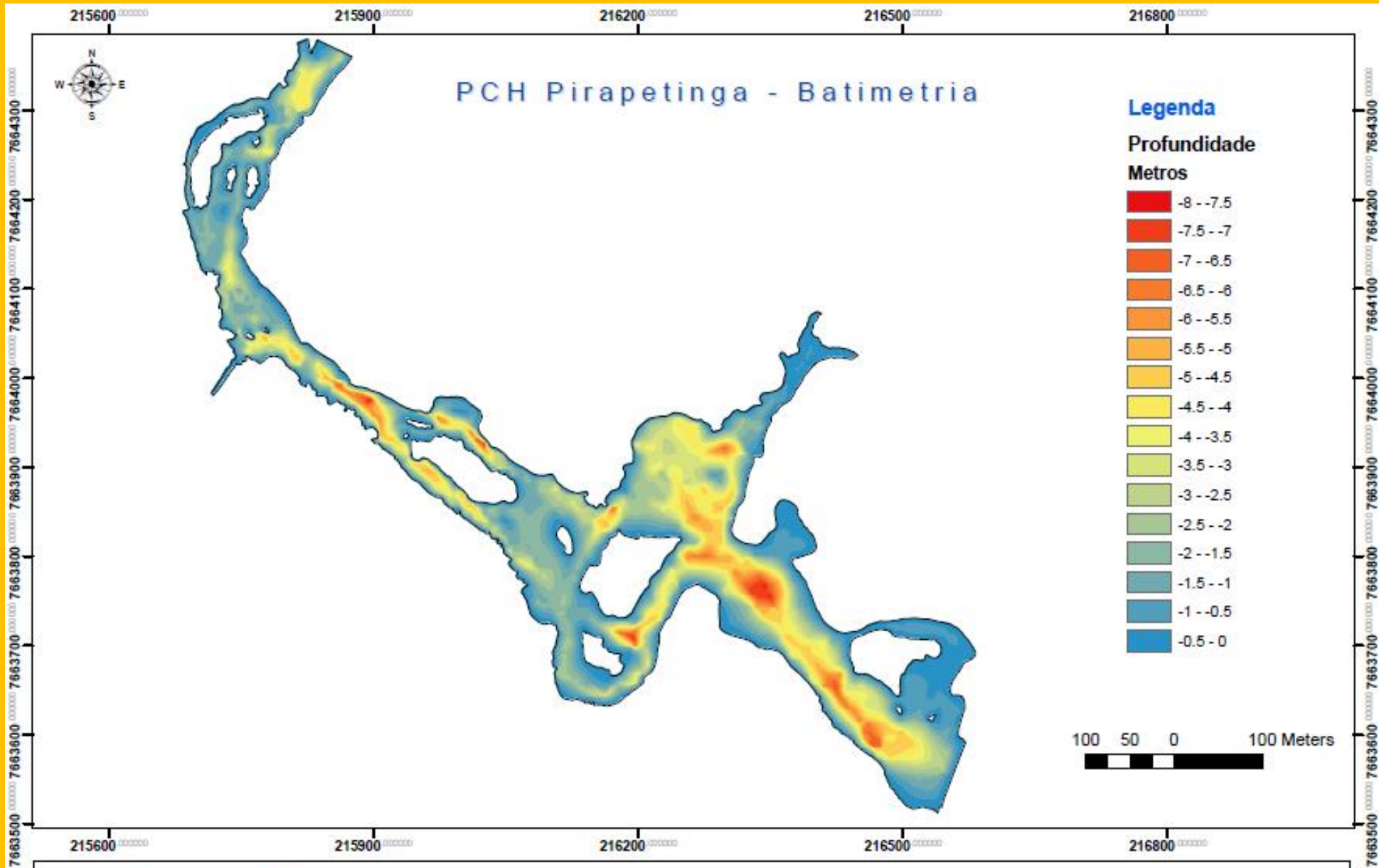






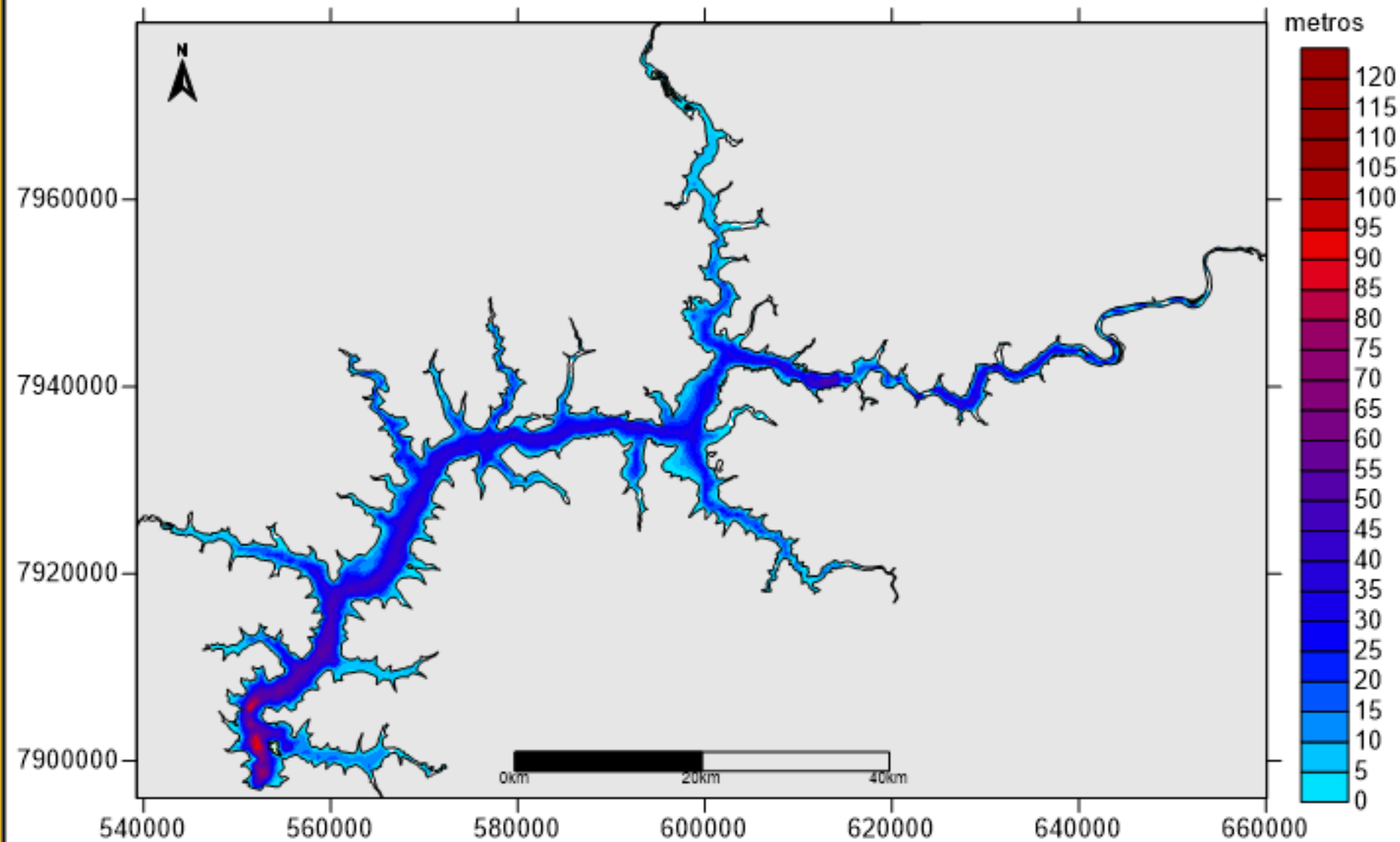
Datum: WGS 1984 UTM Zone 24S
 Projeção: UTM
 Autores: Caires T B, Resende M A, Coelho R M P

Carta Batimétrica
 PCH Pedra do Garrafão
 Rio PCH I - Grupo Neoenergia



Datum: WGS 1984 UTM Zone 24S
 Projeção: UTM
 Autores: Caires T B, Resende M A, Coelho R M P

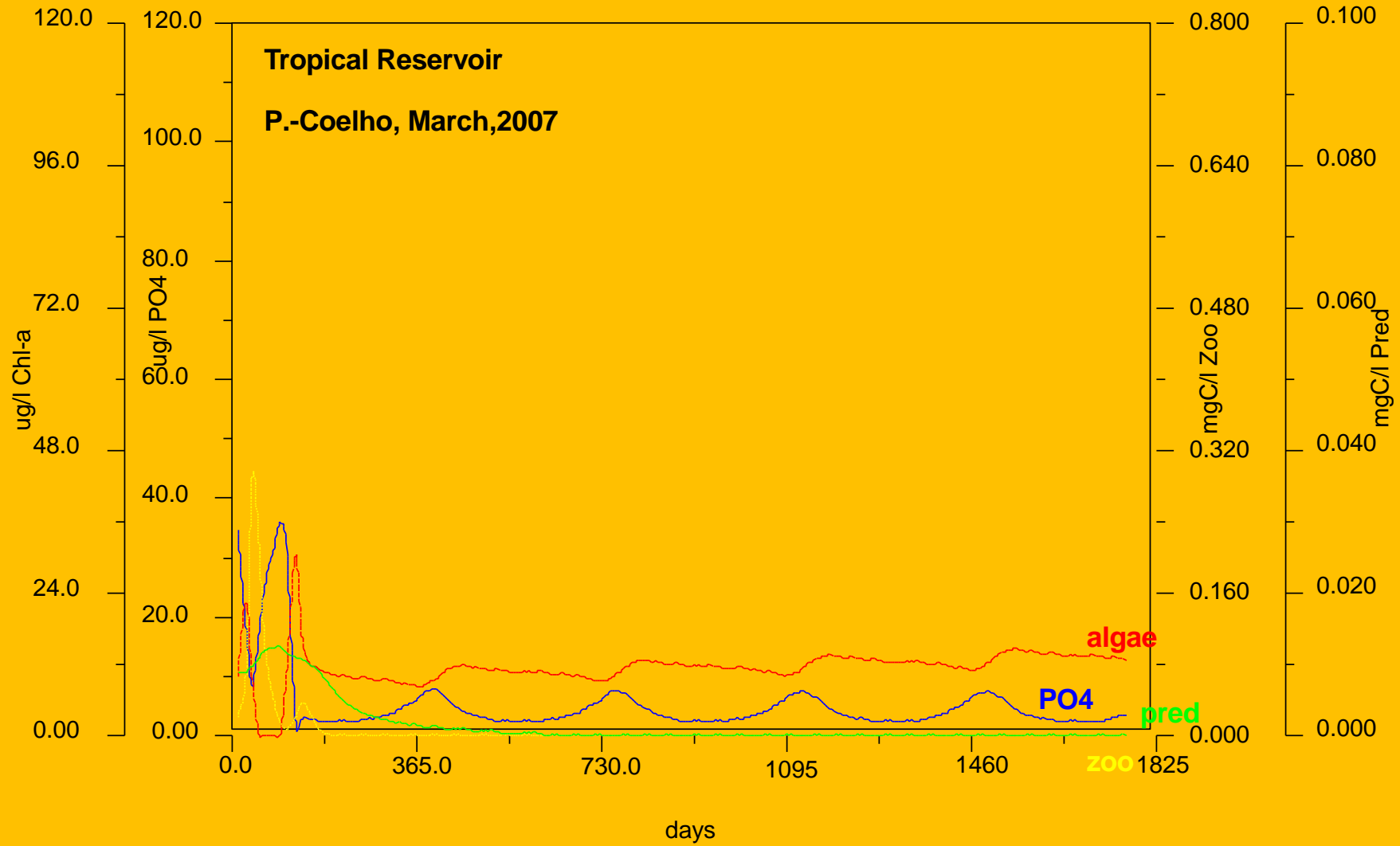
Carta Batimétrica
 PCH Pirapetinga
 Rio PCH I - Grupo Neoenergia



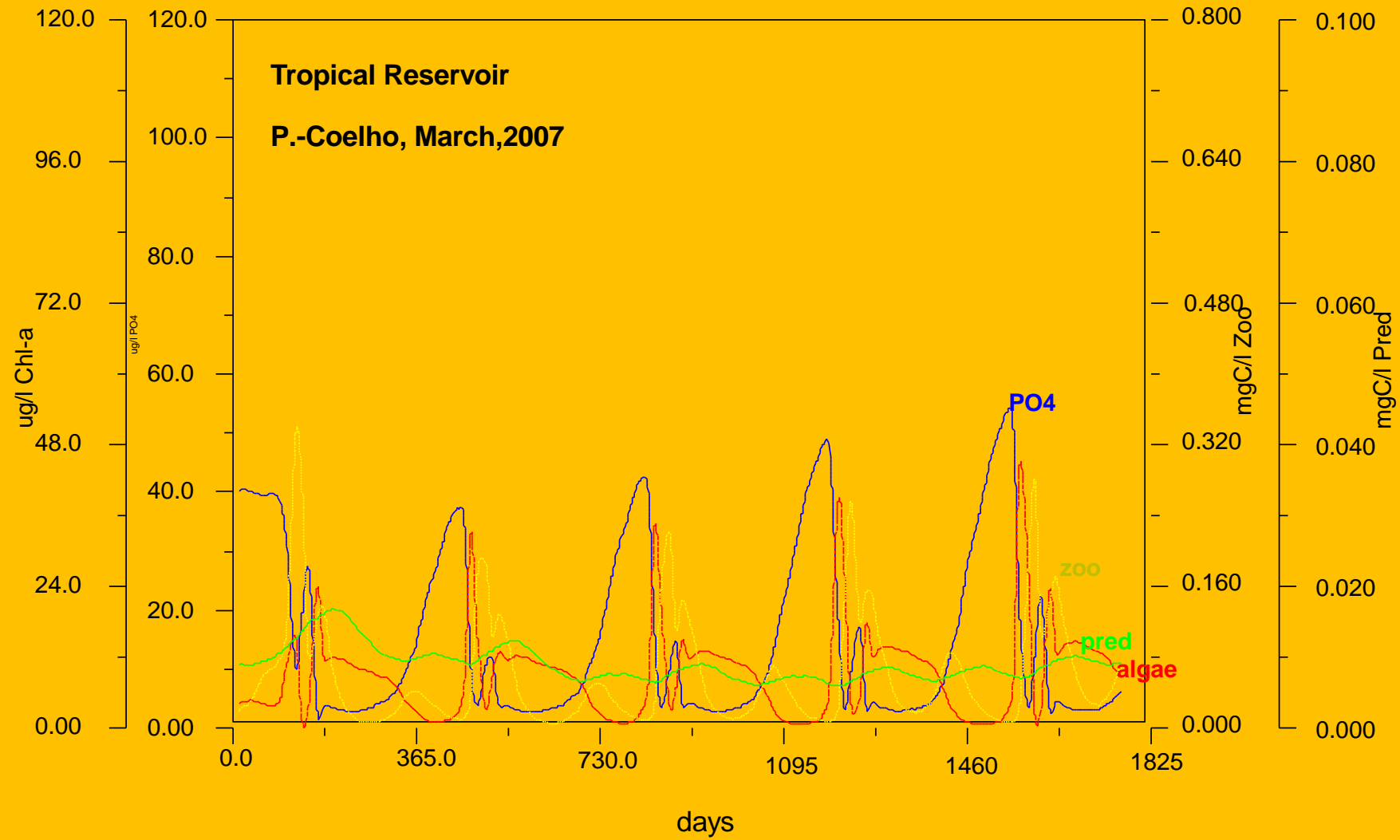
Projeção	UTM	
Datum	WGS84	
Zona	22 S	
Autor	Felipe Cerqueira da Cunha	

Batimetria
Reservatório de São Simão GO/MG

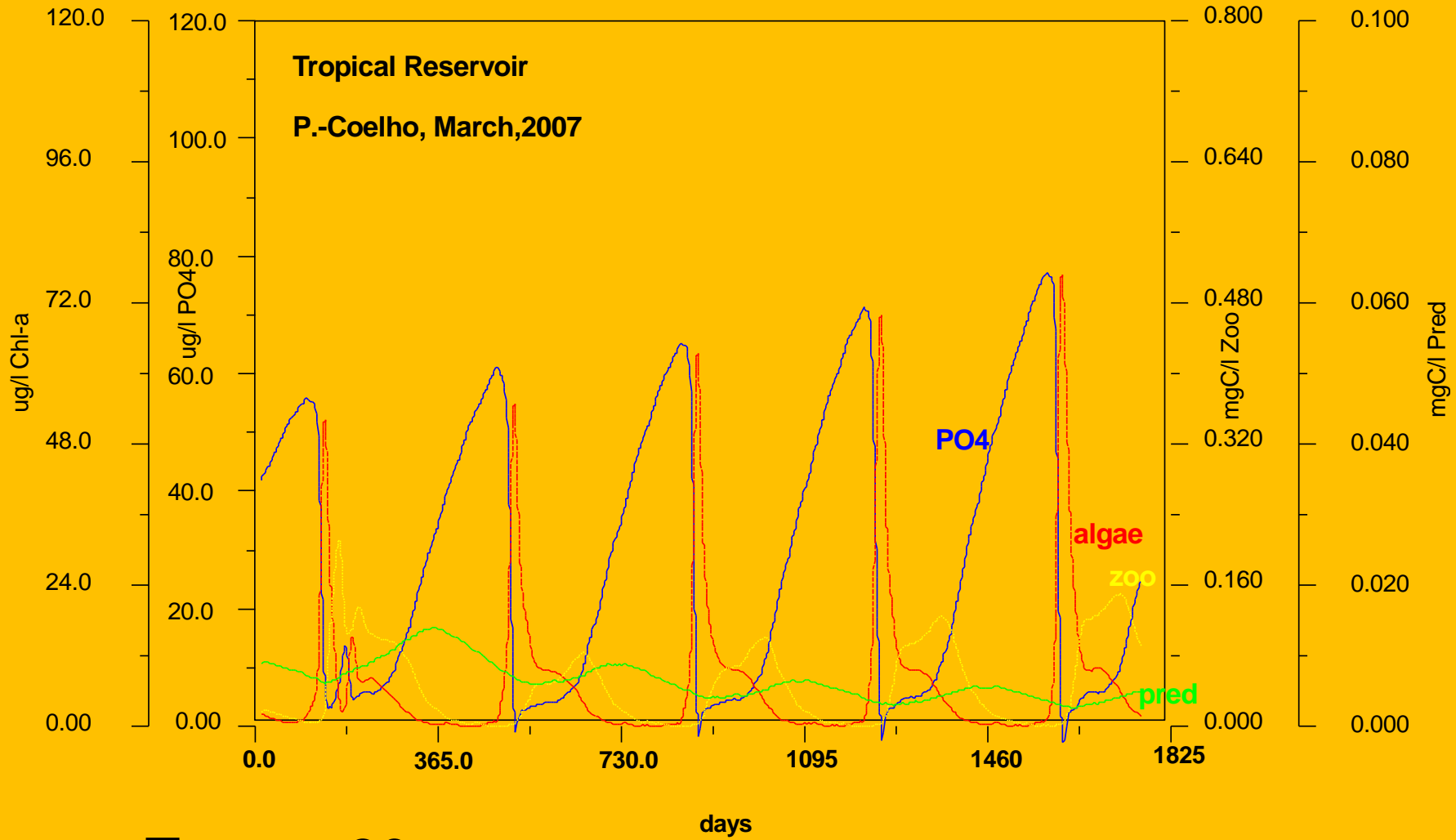
Temperatura



Tmax = 28

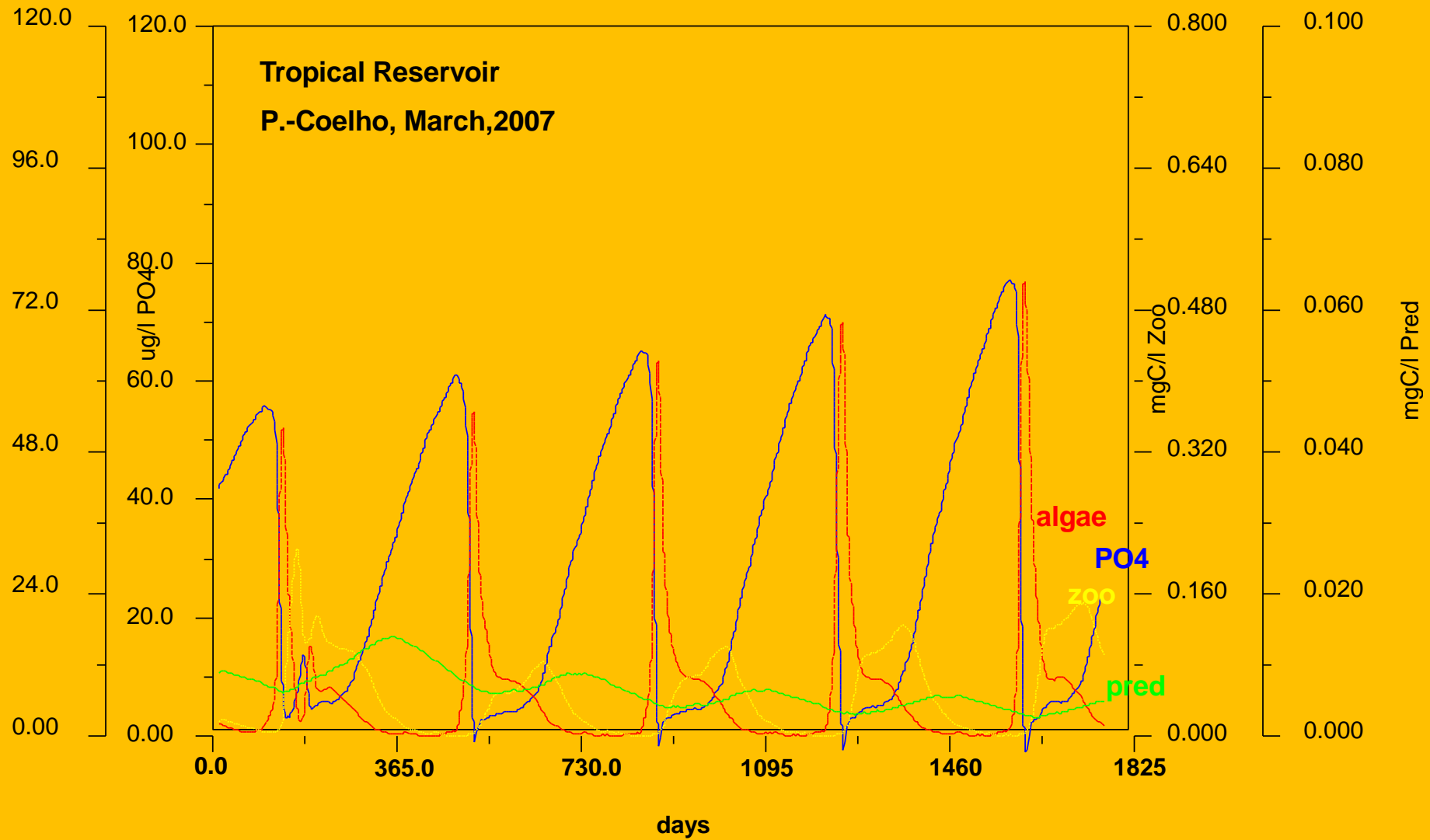


Tmax = 29

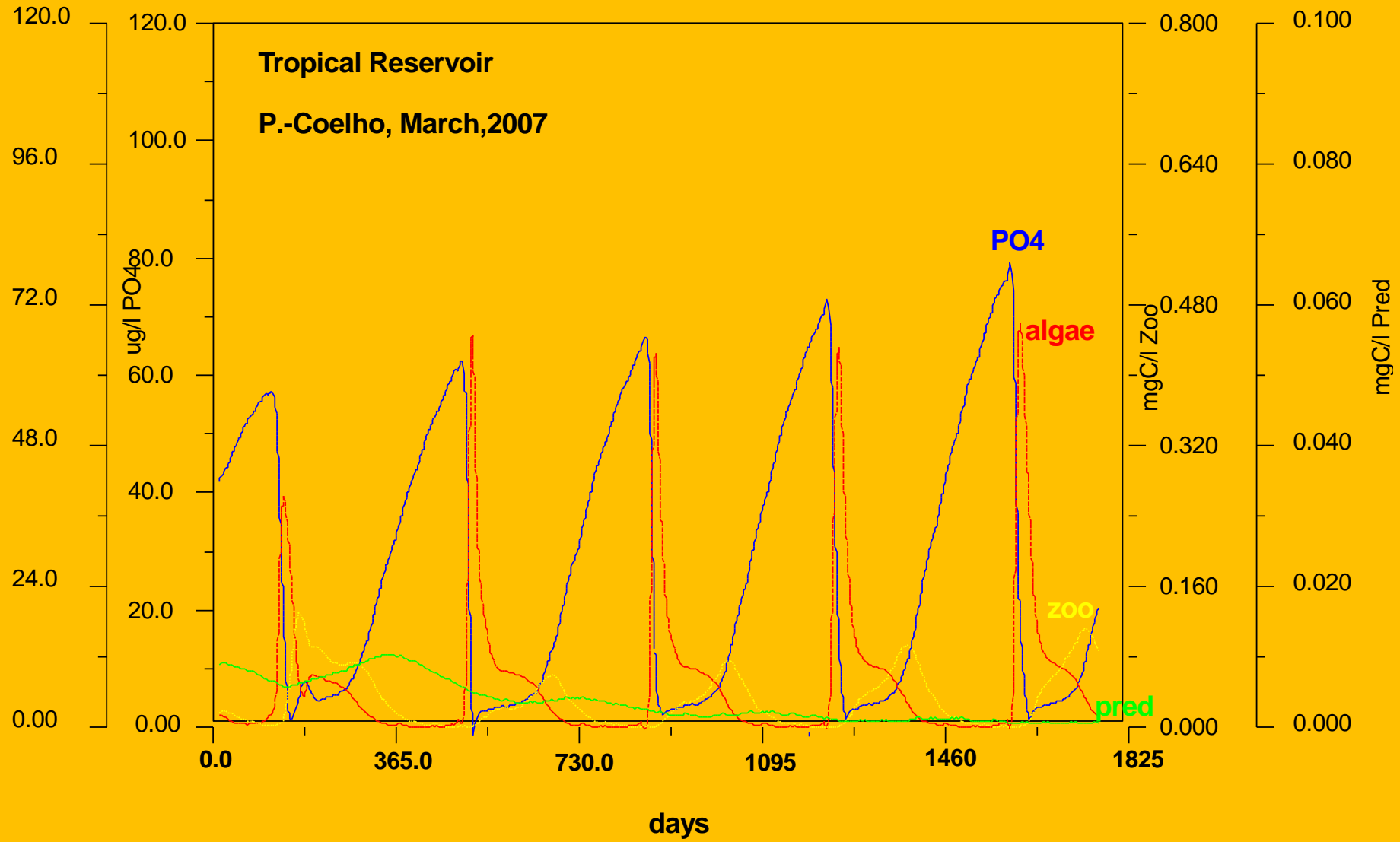


Tmax = 30

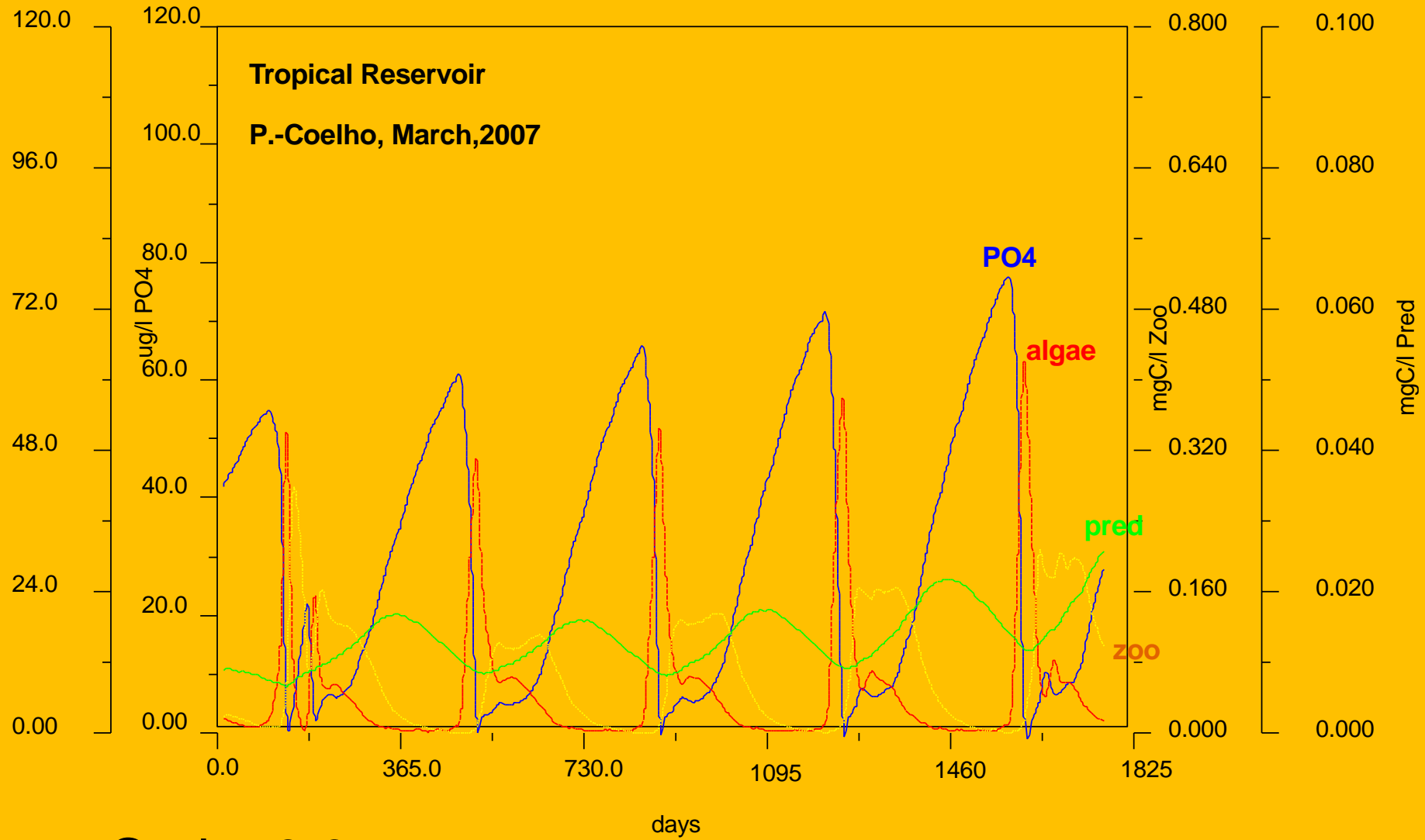
Taxa de Sedimentação



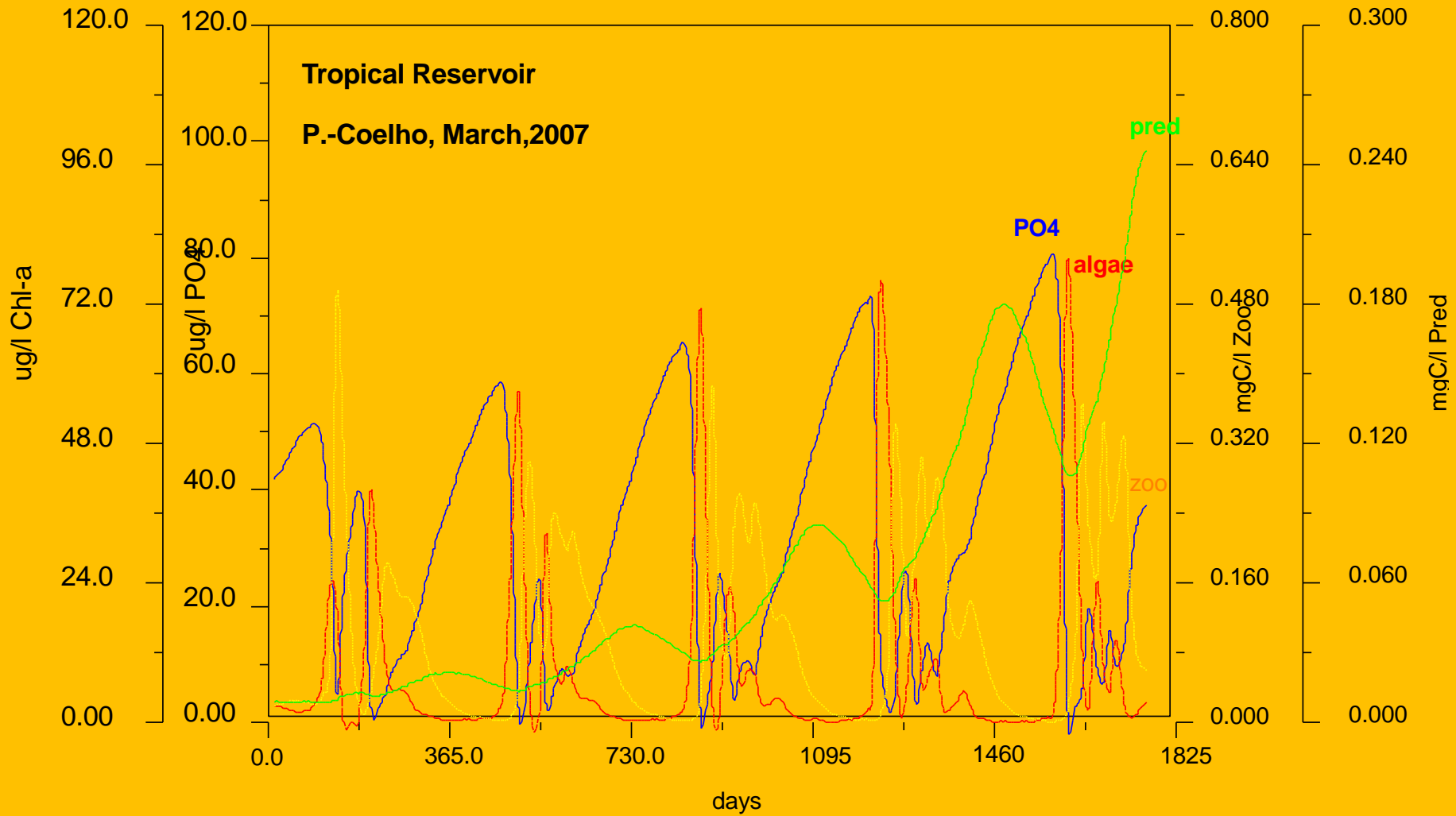
SED = 0.060



Sed = 0.065



Sed = 0.055



SED = 0.040

Conclusões

- O simples aumento da temperatura mostrou ser capaz de causar importantes modificações na estrutura da comunidade planctônica. Sistemas tropicais tendem a ser mais instáveis.
 - O aumento no aporte externo de fósforo causou aumentos em todas as variáveis de estado (fósforo, clorofila-a e biomassa de zooplâncton e de peixes)
 - O aumento no tempo de retenção (90, 180 e 360 dias) causou um agudo aumento em todas as variáveis de estado consideradas
- O aumento nas temperaturas máximas da água causou incrementos notáveis na disponibilidade de fósforo dissolvido e na clorofila-a, ao longo dos anos, independente dos ciclos sazonais
 - A diminuição nas taxas de sedimentação causou aumentos sensíveis nas biomassas de zooplâncton e de predadores (peixes)
 - O modelo mostrou que é capaz de substituir com vantagens modelos usuais de avaliação de capacidade de suporte tais como o modelo de Dillon & Rigler (1974) pois embora modele basicamente o metabolismo do fósforo ele possibilita verificar aspectos importantes da estrutura da comunidade planctônica

Obrigado!

Ricardo Motta Pinto Coelho
Departamento de Biologia Geral
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Bairro São Francisco
Telefax 031 3409 2605
E-mail: rmqc@icb.ufmg.br
<http://ecologia.icb.ufm.br/lgar>

