Iris Amati Martins

Modelagem em SIG da fragilidade ambiental para o processo de
eutrofização antrópica em reservatórios tropicais

*A GIS-Based Model to access the environmental fragility to
human-induced eutrophication in tropical reservoirs*

São Paulo

2017

RESUMO

Os sistemas naturais e humanos são considerados sistemas integrados, com interações complexas e de caráter fortemente multidisciplinar. A abordagem da limnologia da paisagem, como um princípio holístico para avaliar as relações complexas entre a bacia de captação e o reservatório, é de grande importância na produção de diagnósticos consistentes. O modelo de tomada de decisão foi produzido por meio de literatura especializada, conhecimento de especialistas, Processo Hierárquico Analítico (AHP) e Avaliação Multicritério (MCE). O modelo foi desenvolvido para atuar em escala da paisagem, considerando a bacia de captação como a escala observacional. Foram selecionados sete critérios (variáveis preditoras) para determinar o grau de fragilidade ambiental para o processo de eutrofização antrópica em reservatórios tropicais: Variáveis Intrínsecas do Reservatório: (1) morfometria (profundidade) e Tempo de Retenção (RT); (2) Variáveis Limnológicas: Zona Eufótica e presença de macrófitas de crescimento intensivo; (3) Variáveis Antrópicas: Fonte de Poluição Difusa Potencial; e (4) Variáveis Hidrológicas: Taxa de Sedimentação e escoamento superficial potencial. No processo de ponderação das variáveis, todas as matrizes foram consistentes e os especialistas priorizaram o Escoamento Superficial potencial e a Fonte de Poluição Difusa Potencial com os principais responsáveis pelo processo de eutrofização antrópica. Apesar dos critérios e pesos serem fixos para os reservatórios tropicais, existe a possibilidade de ajuste do modelo de acordo com situações especiais, já que o modelo é flexível suficiente para ser utilizados em outras bacias de captação, com características diferentes e intrínsecas. O modelo também é adaptável em função da disponibilidade de base de dados.

Palavras-chave: Sistema Complexo, Modelo de Tomada de decisão, Sensoriamento Remoto, Análise Espacial, Bacia de Captação

ABSTRACT

The human and natural systems are integrated systems, with complex interactions and a strong multidisciplinary character. The application of landscape limnology, as a holistic principle to address the complex relationships between the watershed and reservoir, are of great importance to produce consistent diagnoses and predictions. The GIS-based model was performed by using literature, expert knowledge, Analytical Hierarchy Process (AHP) and Multi-Criteria Evaluation (MCE). The model was performed in a landscape scale considering the watershed as the observational scale. We selected seven criteria (predictor variables) to assess the environmental fragility to human-induced eutrophication in tropical reservoirs: (1) Intrinsic Reservoir Variables: morphometry (depth) and Retention Time (RT); (2) Limnological Variables: euphotic zone and intensive-growth macrophytes presence; (3) Anthropogenic Variable: Potential Non-Point Source (NPS); and (4) Hydrological Variable: Sedimentation Rate and Potential Runoff. In the weighting process, all matrices were consistent and the experts prioritized the potential runoff and potential NPS criteria as the main drivers of human-induced eutrophication. Although the criteria and its weights are considered fixed for any tropical reservoir, it is possible to adjust them according to specific situations since the model proposed is flexible enough to be used in different watersheds with different and intrinsic characteristics and adapted according to the database availability.

Keywords: Complex System, Decision-Making Process, Environmental Fragility, Remote Sensing, Spatial Analysis, Watershed

CAPÍTULO I

Problema Objeto do Estudo

1. INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento humano ocorre o aumento da demanda por espaços e recursos, o que leva a uma rápida mudança da cobertura e do uso do solo, associada às pressões nos ambientes aquáticos (Asante *et al.*, 2008; Catherine *et al.*, 2013). Sendo assim, o crescimento populacional gera respostas contraditórias, já que há um aumento da necessidade de aquisição de água de boa qualidade para o consumo humano, para atividades econômicas e desenvolvimento, assim como leva ao aumento de atividades que geram impactos negativos nos corpos hídricos, tais como despejo indiscriminado de resíduos líquidos e sólidos *in natura* - domésticos e industriais, uso e ocupação impróprios, práticas inadequadas de agricultura, degradação ambiental e destruição da mata ciliar (Asante *et al.*, 2008; Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2011).

Ambientes aquáticos são extremamente vulneráveis aos impactos provocados pelas atividades humanas, as quais levam à diminuição da resiliência do sistema. O mesmo pode ser observado para os reservatórios, que são criados pelo represamento de um rio, formando um sistema cuja hidrodinâmica é intermediária entre o lótico e o lântico. Trata-se de ecossistemas modificados e complexos, construídos em resposta às demandas de crescimento econômico. Sofrem influências de sua bacia de captação, muitas vezes altamente antropizada, as quais refletem em diferentes níveis de impactos (Gibson *et al.*, 2000; Dodds *et al.*, 2006), descarga de sedimentos finos (argila, principalmente), causando efeitos negativos na biota aquática, já que há aumento do material particulado, redução da penetração de luminosidade e aumento da turbidez da água, reduzindo a produção primária, aumento da concentração de nutrientes, como nitrogênio e fósforo e a proliferação de algumas espécies fitoplanctônicas (Davies-Colley *et al.*, 1992; Esteves, 2011; Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2011), podendo levar à eutrofização, problema central de gestão e manejo em reservatórios.

A cobertura e uso solo influenciam o escoamento superficial. O escoamento superficial é originado nas precipitações. A água chega ao solo e parte dela é infiltrada, parte é retirada pelas depressões do terreno e parte escoar pela superfície. A taxa de escoamento superficial é fortemente aumentada pela impermeabilização do solo e amplifica a capacidade de arraste de nutrientes, gerando maiores cargas poluidoras. Áreas antropizadas possuem grande porcentagem de áreas impermeabilizadas e também são caracterizadas pela

presença de atividades potencialmente poluidoras. A associação deste potencial poluidor com a alta taxa de escoamento superficial gera cargas poluidoras difusas de grande magnitude, de origens bastante diversificadas (ligações clandestinas de esgotos, efluentes de fossas sépticas, abrasão e desgaste das ruas pelos veículos, o lixo acumulado nas ruas e calçadas, os resíduos orgânicos de pássaros e animais domésticos, atividades de construção, resíduos de combustível, óleos e graxas deixados por veículos, entre outros), que são lançadas nos sistemas de drenagem gerando preocupações crescentes no contexto do controle da poluição e da proteção dos recursos hídricos (Porto, 1998; Paz *et al.*, 2003).

Segundo Santos *et al.* (1999) a perda de sedimentos e nutrientes por escoamento superficial é uma fonte importante de poluição por cargas difusas, as quais podem comprometer seriamente a qualidade dos mananciais pelo carregamento de compostos de natureza tóxica e nutrientes, principalmente o nitrogênio e fósforo, levando ao processo de eutrofização antrópica.

Ao abordarmos a questão da eutrofização, devemos fazê-lo por meio de uma abordagem multidisciplinar, já que encontramos uma grande variedade de fatores e processos físicos, químicos e biológicos que se inter-relacionam (sistemas complexos). O uso de métodos que se opõem ao paradigma reducionista, que facilitem a qualificação e a quantificação dos processos e que auxiliem na tomada decisão é de grande importância. As bacias de captação são sistemas complexos, formadas por um mosaico de paisagens e interações, oriundas dos sistemas naturais e humanos, e que influenciam a dinâmica também complexa dos corpos hídricos. Desta forma, o estudo da influência da bacia de captação em um determinado corpo hídrico demanda a procura por modelos que permitam elucidar as interações de uma forma mais simples e acessível para os tomadores de decisão, buscando reduzir custos e tempo, produzir diagnósticos e previsões, auxiliar a análise quando os dados empíricos são insuficientes ou ausentes, além de produzir resultados confiáveis e consistentes.

O modelo espacial de fragilidade ambiental desenvolvido aqui, em suma, é baseado em métodos que envolvem a seleção de critérios espaciais (variáveis preditoras e de resposta) e a participação de especialistas na ponderação dos mesmos (abordagem construtivista), com potencial para gerar resultados robustos, que se aproximam à realidade, assim como ser uma ferramenta importante no gerenciamento dos recursos hídricos, estimativa de aporte de nutrientes para o

corpo hídrico, determinação dos diferentes graus de fragilidade ambiental e na estimativa de perda de serviços ecossistêmicos, já que produz um diagnóstico ambiental e permite a geração de cenários distintos.

O objetivo geral foi desenvolver um modelo de tomada de decisão capaz de inferir os graus de fragilidade ambiental para o processo de eutrofização antrópica em reservatórios tropicais, utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento (em especial os Sistemas de Informação Geográfica - SIG), tendo como foco a bacia de captação (escala observacional) e considerando a abordagem da limnologia da paisagem.

Este modelo precisava preencher a lacuna existente entre os diferentes campos de conhecimento (engenharias, geologia, geografia, limnologia, ecologia da paisagem) que buscam entender como os diferentes elementos da bacia de captação e os diferentes processos que nela ocorrem, interagem com os corpos hídricos e influenciam seus processos limnológicos. Esta lacuna está relacionada à fragmentação e a compartimentalização do conhecimento, ou seja, ao paradigma reducionista, que deve ser evitado ou mitigado quando se trata de sistemas complexos. As informações oriundas das diversas áreas do conhecimento podem ser integradas (abordagem holística) para aferição dos graus de trofia de um determinado corpo hídrico, com o objetivo de inferir acerca de sua potencialidade em se tornar eutrófico devido a pressões antrópicas na bacia de captação.

Desta forma, as premissas para a seleção do modelo foram:

- ✓ O modelo precisava integrar a interdisciplinaridade que envolve o estudo dos sistemas complexos;
- ✓ O modelo precisava integrar informações quantitativas e qualitativas (entrada do modelo) e geração de um produto espacializado (saída do modelo).

O modelo selecionado foi o modelo de tomada de decisão para avaliação de critérios múltiplos (*Multi Criteria Evaluation* - MCE) de acordo com Eastman *et al.* (1995). Este modelo é desenvolvido em ambiente de SIG e é baseado conhecimento de especialistas.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Sistema Cantareira

O Sistema Cantareira constitui o maior sistema produtor de água da Região Metropolitana do Estado de São Paulo (RMSP), responsável pelo abastecimento de cerca de nove milhões de pessoas na Capital e nos municípios de Franco da Rocha, Francisco Morato, Caieiras, Guarulhos (parte), Osasco, Carapicuíba, Barueri (parte), Taboão da Serra (parte), Santo André (parte) e São Caetano do Sul. Além disso, a água liberada a jusante dos reservatórios do Sistema Cantareira contribui para a regularização dos rios Jaguari, Cachoeira e Atibainha, na bacia do rio Piracicaba, onde existem diversas captações para abastecimento urbano e industrial (ANA, 2016).

O Sistema Cantareira tem por finalidade transpor as águas da bacia do rio Piracicaba para a bacia do Alto Tietê e abrange seis reservatórios (Figura 2.1), os quais são ligados por túneis e canais: Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras. Os quatro primeiros estão localizados em afluentes do rio Piracicaba, que fica na bacia hidrográfica do PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiá) e os dois últimos reservatórios, localizados na bacia hidrográfica do Alto Tietê, têm o objetivo de reter e transpor água para a Estação de Tratamento de Água - ETA Guaraú (ANA, 2016). Duas das barragens são de gestão federal (Jaguari e Cachoeira) e as demais (Jacareí, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras) são de gestão do estado de São Paulo (Figura 2.2).

O Sistema armazena aproximadamente 1,2 trilhão de litros de água, sendo 982 bilhões de litros acima do nível das comportas de transporte por gravidade (também conhecido como volume útil) e o restante abaixo das comportas, volume denominado “reserva técnica” (SABESP, 2014). Possui capacidade de produzir 33 mil litros de água por segundo para a RMSP, sendo que 94% são produzidos na Bacia do PCJ e apenas 6% são produzidos na Bacia do Alto Tietê, pelo rio Juqueri.

Os volumes e as cotas dos reservatórios são apresentados na Figura 2.3, enquanto que as vazões são apresentadas na Figura 2.4.

Figura 2.1 - Localização e perfil do Sistema Cantareira e seus reservatórios.

Figura 2.2 - Interligação dos reservatórios federais e estaduais, e túneis do Sistema Cantareira. Fonte: ANA, 2016.

Figura 2.3 - Volumes dos reservatórios do Sistema Cantareira e localização em termos de altitude. Fonte: ANA, 2013.

Figura 2.4 - Vazão Natural (QNat), Vazão a Jusante (Qjus), Vazão de Transferência (QT7, QT6, QT5, QESI), Porcentagem de Volume Operacional (Vop) nos reservatórios do Sistema Cantareira: (a) Valores obtidos para 05/01/2009, data da imagem Landsat 5 utilizada no presente trabalho, para refletir as condições do período chuvoso; (b) Valores obtidos para 01/09/2009, data da imagem Landsat 5 utilizada no presente trabalho, para refletir as condições do período seco; (c) Valores obtidos para 12/11/2008, data dos dados empíricos (Macedo, 2011) utilizados no presente trabalho, para refletir as condições do período chuvoso; (d) Valores obtidos para 24/05/2008, data dos dados empíricos (Macedo, 2011) utilizados no presente trabalho, para refletir as condições do período seco. Fonte: SABESP, 2017.

2.2 Sub-bacia do Rio Juqueri

A Sub-bacia do Rio Juqueri é uma das cinco sub-regiões que compõem a Bacia do Alto Tietê. Integra a UGRHI-06 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos) e compreende os municípios de Cajamar (131,52Km² de área total e 89,3% inserida na UGRHI-05), Caieiras (96,85Km² de área total e 100% inserida na UGRHI-06), Francisco Morato (48,73Km² de área total e 100% inserida na UGRHI-06), Franco da Rocha (133,33Km² de área total e 100% inserida na UGRHI-06), Mairiporã (321,02Km² de área total e 87,3% inserida na UGRHI-06) e Nazaré Paulista (326,26Km² de área total e 16,2% inserida na UGRHI-06). Segundo o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos (FABHAT, 2013), 60,7% dos domicílios estão conectados à rede geral de esgotamento.

Na Sub-bacia do Rio Juqueri a precipitação média é de 1.440mm (FABHAT, 2013). Nela estão localizados os Reservatório Paiva Castro e Águas Claras.

2.3 Reservatório Paiva Castro

O reservatório Paiva Castro, objeto deste estudo, iniciou sua operação em 1973, é o último reservatório do sistema de derivação por gravidade e está localizado a jusante do município de Mairiporã, Coordenada UTM 23K 410279 e 7416693, Datum SIRGAS 2000 (Figura 2.5). A extensão do seu espelho d'água é de 445ha, a área de drenagem compreende 33.715ha, as vazões afluentes representam em média 4.700l/s e sua contribuição para o Sistema Cantareira representa 2.000 l/s, 6,1% da vazão total do Sistema Cantareira (ANA, 2013). Por ser o receptor final do Sistema, pode então refletir a qualidade final da água que será enviada para a ETA do Guaraú.

O Tempo de Residência (TR) do reservatório foi calculado pelo laboratório de Limnologia do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, com base no volume máximo (ANA, 2013) e na vazão média (Netto & Barros, 2010; ANA, 2013) do reservatório. O TR do Reservatório Paiva Castro foi, então, estimado em 13.6 dias.

A seguir são apresentadas as variações históricas dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos medidos entre os anos de 2001 e 2011 na estação do JQJU 00900 do reservatório (Figuras 2.6 a 2.9), localizado na Ponte Santa Inês, na

rodovia que liga Mairiporã à Franco da Rocha, Coordenada UTM 23K 330144 e 7408605, Datum SIRGAS 2000.

Figura 2.5 - Reservatório Paiva Castro.

Figura 2.6 - Médias anuais dos parâmetros pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Turbidez. Fonte: SABESP, 2017.

Figura 2.7 - Médias anuais das concentrações de Fósforo Total, Nitratos, Nitritos, Nitrogênio Amoniacal e Nitrogênio Total. Fonte: SABESP, 2017.

Figura 2.8 - Médias anuais dos parâmetros Coliformes Fecais e Sólidos Totais. Fonte: SABESP, 2017.

Figura 2.9 - Variações observadas ao longo de dez anos para os parâmetros Índice de Qualidade de Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET). Fonte: SABESP, 2017.

Segundo a Resolução CONAMA 357/05 (MMA, 2005) o reservatório Paiva Castro está enquadrado na classe Especial, então deve obedecer aos padrões da Classe 1 da Resolução CONAMA 20/86 (MMA, 1986). A maioria dos parâmetros observados encontra-se dentro dos valores de referência do CONAMA, com exceção da DBO, que em 2007 triplicou o seu valor, mas retornou ao seu padrão no ano seguinte, no limite do valor de referência do CONAMA.

Ao considerar os valores de 0,025mg/l a 0,10mg/l como carga máxima admissível de fósforo total para a ocorrência de eutrofização em um reservatório (Bittencourt & Gobbi, 2006), observa-se que o parâmetro fósforo total manteve-se dentro da faixa de variação admissível ao longo dos anos, mas parece haver um padrão bianual onde a sua concentração aproxima-se do limiar de 0,10mg/l. Este padrão pode ser melhor visualizado na Figura 2.9. Nesta mesma figura observa-se que o reservatório Paiva Castro se mostrou predominantemente mesotrófico ao longo dos dez anos. Ressalta-se que estes valores representam apenas uma pequena janela espacial do reservatório.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen P., Strathern M. & Varga L. (2010) Complexity: the evolution of identity and diversity. Pages 43–63 in P. Cilliers and R. Preiser, editors. *Complexity, difference and identity*. Springer, London, UK; New York, New York, USA.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2013) *Dados de referência acerca da outorga do Sistema Cantareira*.
- ANA, Agência Nacional de Águas (2016). *Outorga do Sistema Cantareira*.
- Asante K.A., Quarcoopome T. & Amevenku F.Y.K. (2008) Water Quality of the Weija Reservoir after 28 Years of Impoundment. *West African journal of applied ecology*, **13**, 125-131.
- Ascough J.C.I., Maier H.R., Ravalico J.K. & Strudley M.W. (2008) Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecological modelling*, **219**, 383-399.
- Bar-Yam, Y. (1997) Dynamics of complex systems. Perseus Books Cambridge, MA, USA.
- Bielenki Júnior C. & Barbasse P.A. (2012) *Geoprocessamento e recursos hídricos: Aplicações Práticas*. São Carlos: EdUFSCAR. 257p.
- Bitencourt M.D. & Mantelli L.R. (2015) Spatial analysis of limnological parameters using remote sensing and geoprocessing: two case studies. In: *Reservoirs Ecology and Interfaces*. (Eds L.M. Pompêo & V. Moschini-Carlos & P.Y. Nishimura & S. Cardoso-Silva & J.C. López-Doval), pp. 160-176, Sao Paulo, BR.
- Bittencourt S. & Gobbi, E.F. (2006) Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório Piraquara II, uma aplicação do processo TMDL. *Revista Bras. Ci. Solo*, **30**, 595-603.
- Branco S.M. (1986) *Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária*. São Paulo. CETESB/ASCETESB.
- Branco S.M. & Rocha A.A. (1977) *Poluição, Proteção e usos Múltiplos de represas*.

São Paulo: Edgard Blücher/CETESB.

Buldyrev, S.V., Parshani R., Paul G., Stanley, H.E., Havlin S. (2010) Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, **464**, 1025-1028.

Burrough, P.A. (1998). Dynamic Modelling and GIS. In: *Geocomputation: a primer* (Eds P. Longley, S.M. Brooks, R. MacDonnel, & W. MacMillan), pp. 165±192). Wiley.

Câmara G., Davis. C., Monteiro A.M. (2015) *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE.

Catherine A., Mouillot D., Maloufi S., Troussellier M. & Bernard C. (2013) Projecting the Impact of Regional Land-Use Change and Water Management Policies on Lake Water Quality: An Application to Periurban Lakes and Reservoirs. *PLoS One*, **8**, 1-11.

Cilliers, P. (1998) *Complexity and postmodernism*. Understanding complex systems. Routledge, London, UK.

Cilliers, P. (2005) Complexity, deconstruction and relativism. *Theory, Culture and Society*, **22**, 255–267.

Cilliers P., Biggs H.C., Blignaut S., Choles A. G., Hofmeyr J. S., Jewitt G.P.W., Roux D.J. (2013) Complexity, modeling, and natural resource management. *Ecology and Society*, **18**, 3-1.

Cooke G.D., Welch E.B., Peterson S.A. & Nichols S.A. (2005) *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. CRC Press, Florida, US.

Correll D.L. (1998) The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.*, **27**, 261-266.

Christofoletti, A. (1999) *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher.

Davies-Colley R., Hickey C., Quinn J. (1992) Effects of Clay Discharges on Streams. Optical Properties and Epilithon. *Hydrobiologia*, **248**, 215-234.

Dodds, W., Carney E., Angelo R. T. (2006) Determining Ecoregional Reference

- Conditions for nutrients, secchi depth and chlorophyll a in Kansas Lakes and Reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, **22**,151-159.
- Esteves F.A. (2011) *Fundamentos da limnologia*. Interciência, Rio de Janeiro.
- Eastman J.R., Jin W., Kyem P.A.K., Toledano J. (1995) Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **61**, 539-547.
- Eastman J.R. (1999) Geographical Information Systems: principles, techniques, management and applications. In: *Geographical Information Systems*. (Eds P.A. Longley & M.F. Goodchild & D.J. Maguire & D.W. Rhind), pp. 493-502. Abridged, New York, US.
- Eastman J.R. (2015) *TERRSET Tutorial*, Clark Labs-Clark University, Worcester.
- FABHAT (2013) *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos: Bacia Hidrográfica do Alto Tietê - UGRHI 06*.
- Forman R.T.T. (1995) *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.
- Franceschet M. (2015) Complex Beauty. *Complex Systems*, **24**.
- Gibson G. R., Carlson R. E., Simpson J., Smeltzer E., Gerritsen J., Chapra S., Heiskary S., Jones J., Kennedy R. (2000) *Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA-822-B00-001.
- Hay G.J., Dube P., Bouchard A., Marceau D.J. (2002) A scale-space primer for exploring and quantifying complex landscapes. *Ecological Modelling*, **153**, 27–49.
- Hutchinson G.E. (1973) Eutrophication. *American Scientist*, **61**, 269-279.
- Hynes, H.B.N. (1975) The stream and its valley. *Verh. Int. Verein. Limnol.* **19**, 1–5.
- Jensen J.R. (2006) *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

- Jeppesen E., Jensen J.P., Søndergaard M., (2002) Response of phytoplankton, zooplankton and fish to reoligotrophication: an 11-year study of 23 Danish lakes. – *Aquat. Ecosys. Health & Manage*, **5**, 31-43.
- Johnson L.B. & Gage S.H. (1997) Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, **37**, 113-132.
- Jørgensen S.E. (1995) Complex ecology in the 21st century. In: Complex Ecology: The Part-Whole Relation in Ecosystems (Eds. Patten, B.C., Jørgensen, S.E., Auerbach, S.I.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 17-19.
- Jørgensen S.E., Löffler H., Rast W., Straškraba M. (2005) *Developments in Water Science: Lake and Reservoir Management*, Elsevier.
- Kimmerling A. J. (1994) Geographical information systems and cartography. *Proceedings of the seminar on teaching convencional and digital map prodution lines*, 35-47.
- Kirk J.T.O. (2011) *Light and Photosynthesis in aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.M., O'brien W.J. (2000) Integration of lakes and streams in a landscape perspective: the importance of material processing on spatial patterns and temporal coherence. *Freshwater Biology*, **43**, 477-497.
- Kroger S., Law R.J. (2005) Sensing the Sea. *Trends in Biotechnology*, **23**, 250-256.
- Levin S.A. (1999) *Fragile dominion: complexity and the commons*. Perseus Books, Reading, Massachusetts, USA.
- Lillesand T.M. & Kiefer R.W. (2000) *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons, Minnesota, US.
- Magnuson J.J. & Kratz T.K. (2000) Lakes in the landscape: Approaches to regional limnology. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**, 74–87.
- Majdandzic A., Podobnik B., Buldyrev S.V., Kenett D.Y., Havlin, S., Eugene Stanley H. (2013) Spontaneous recovery in dynamical networks. *Nature Physics*. **10**:

34–38.

Meireles M. S. P., Moreira F. R., Câmara G. (2007) Técnicas de inferência espacial. In: Meireles, M. S. P.; Câmara, G.; Almeida, C. M. 2007. *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Editora Embrapa.

Meneguette A. A. C. (1994) *Introdução à cartografia*. Presidente Prudente: [s.n.].

Miranda J. I. (2010) *Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas*. Editora Embrapa.

Ministério do Meio Ambiente (1986) Resolução CONAMA 20/86.

Ministério do Meio Ambiente (2005) Resolução CONAMA 357/05.

Moore J.W., Schindler D.E., Scheuerell M.D., Smith D. & Frodge J. (2003) Lake eutrophication at the urban fringe, Seattle region, USA. *Ambio*, 32, 13-18.

Morin E. (1992) From the concept of system to the paradigm of complexity. *Journal of Social and Evolutionary Systems*, **15**, 371–385.

Moss B. (1998) Shallow Lakes: Biomanipulation and Eutrophication. *Scope Newsletter*, **29**, 1-45.

Netto P.N., Barros L.A.A. (2010) *Uma História Visual da Construção do Sistema Cantareira*.

Novo, E.M.L.M. (2010) *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blücher.

Paz M., Gastaldini M. Geller R. (2003) *Comparação da Carga Difusa em Bacia Urbana e Rural*. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Maria: ABES- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Pettorelli N., Laurance W.F., O'brien T.G., Wegmann M., Nagendra H. & Turner W. (2014) Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, **51**, 839-848.

Porto M.F.A. (1998) Aspectos Qualitativos do Escoamento Superficial em Áreas

- Urbanas. In: Braga, B.; Tucci, C.E.M.; Tozzi, M. *Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação, controle*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, p.387-428.
- Rocha L.M. (1999). Complex Systems Modeling: Using Metaphors from Nature in Simulation and Scientific Models. *BITS: Computer and Communications News*.
- Rosen R. (1991) *Life itself. A comprehensive enquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. Columbia University Press, New York, USA.
- Saaty T.L. (2008) Decision-making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, **1**, 83-98.
- SABESP (2014) *Relatório de Sustentabilidade de 2014*.
- SABESP (2017) *Divulgação de Informações dos Mananciais*. Site de Divulgação: <<http://www2.sabesp.com.br/mananciais/DivulgacaoSiteSabesp.aspx>>
- Santos M. A. S. (1999) Qualidade de água - estudo de casos: sistema Rio Grande x sistema Rio Claro. *Simpósio de Recursos Hídricos*, XIII. Belo Horizonte.
- Sayama H. (2015) *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. Open SUNY Textbooks, Milne Library State University of New York, USA.
- Scheffer M. (1990) Multiplicity of Stable States in Fresh-Water Systems. *Hydrobiologia*, **200**, 475-86.
- Scheffer M., Redelijkheid M.R. & Noppert F. (1992) Distribution and dynamics of submerged vegetation in a chain of shallow eutrophic lakes. *Aquatic Botany*, **42**, 199-216.
- Scheffer M. (1998) *Ecology of Shallow Lakes*. Population and Community Biology. London: Chapman and Hall.
- Scheffer M. (2009) Alternative Stable States. In: *Critical Transitions in Nature and Society*, Chapter II, pp. 11-36, Princenton University Press
- Shaw I. S. & Simões M. G. (1999) *Controle e Modelagem Fuzzy*. Editora Edgard Blücher.

- Schindler D.W., Hecky R.E., Findlay D.L., Stainton M.P., Parker B.R., Paterson M.J., Beaty K.G., Lyng M. & Kasian S.E.M. (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *PNAS*, **105**, 11254-11258.
- Skyttner L. (2001) *General systems theory: ideas and applications*. World Scientific Publishing, Hackensack, New Jersey, USA.
- Soranno P.A., Webster K.E., Cheruvilil K.S. & Bremigan M.T. (2009) The lake landscape-context framework: linking aquatic connections, terrestrial features and human effects at multiple spatial scales. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, **30**, 695-700.
- Soranno P.A., Cheruvilil K.P., Webster K.E., Bremigan M.T., Wagner T. & Stow C.A. (2010) Using landscape limnology to classify freshwater ecosystems for multi-ecosystem management and conservation. *BioScience*, **60**, 440-454.
- Straškraba M. & Tundisi J.G. (1999) *Guidelines of lake management: Reservoir Water Quality Management*, Kusatsu, JP.
- Tundisi J.G., Matsumura-Tundisi T. & Rocha O. (1999) Theoretical basis for reservoir management. In: *theoretical reservoir ecology and its applications*. (Eds J.G. Tundisi & M. Straškraba), pp. 505-528. Academy of Science & Backhuys Publishers, São Carlos, BR.
- Tundisi J., Matsumura-Tundisi T. (2011) *Limnologia*. Editora Oficina de Textos, p. 632.
- Voinov A.A. (2008) *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*. Academic Press, CA, USA.
- Voogd H. (1983) *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London, UK.
- Weaver, W. (1948) Science and Complexity. *American Scientist*, **36**, pp. 536–544.
- Welch E.B., Jacoby J.M. & Lindell T. (2007) *Pollutant Effects in Freshwater: Applied Limnology*, CRC Press, New York, US.

Wiens J.A. (2002) Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, **47**, 501-515.

Wu J., Marceau D. (2002) Introduction Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling*, **153**, 1–6.

Zadeh L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, **8**, 338-353.

require the access to spatially comprehensive and relevant databases to allow the state of ecosystems, as provided by remote sensing (Trotter *et al.*, 2001; Jensen, 2006; Pettorelli *et al.*, 2014). The GIS is a key component (Lovett & Appleton, 2008) in our conceptual model, since it provides a capability for recording and analysing descriptive characteristics about landscape features (Lillesand & Kiefer, 2000).

5. CONCLUSION

The landscape limnology approach, spatial analyses principles, and decision-making models based on multi-criteria evaluation, and multidisciplinary expert knowledge, have the potentiality to fill the gap that exist between the researchers of different knowledge when the objective is the environmental assessment, planning or management of freshwater, which is a complex system that interact with other complex systems in the landscape. We also concluded that the model proposed is flexible enough to be used in different watersheds with different and intrinsic characteristics and adapted according to the database availability.

6. ACKNOWLEDGMENTS

We thank the experts that were consulted for the development of this study and specially Marcelo Luiz Martins Pompêo, Ana Lúcia Bradimarte, Claudia Bitencourt, and Sheila Cardoso-Silva. We also thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for the scholarship.

7. REFERENCES

- Asante K.A., Quarcoopome T. & Amevenku F.Y.K. (2008) Water Quality of the Weija Reservoir after 28 Years of Impoundment. *West African journal of applied ecology*, **13**, 125-131.
- Ascough J.C.I., Maier H.R., Ravalico J.K. & Strudley M.W. (2008) Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. *Ecological modelling*, **219**, 383-399.
- Baxter R.M. (1977) Environmental Effects of Dams and Impoundments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **8**, 255-283.

- Bishop Y.M., Fienberg S.E., Holland P.W., Light R. & Mosteller F. (2007) *Discrete Multivariate Analysis - Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, US.
- Bitencourt M.D. & Mantelli L.R. (2015) Spatial analysis of limnological parameters using remote sensing and geoprocessing: two case studies. In: *Reservoirs Ecology and Interfaces*. (Eds L.M. Pompêo & V. Moschini-Carlos & P.Y. Nishimura & S. Cardoso-Silva & J.C. López-Doval), pp. 160-176, Sao Paulo, BR.
- Boyle D.P., Gupta H.V. & Sorooshian S. (2003) Multicriteria Calibration of Hydrologic Models. In: *Calibration of Watershed Models*. (Eds Q. Duan & H.V. Gupta & S. Sorooshian & A.N. Rousseau & R. Turcotte), pp. 185-196 American Geophysical Union, Washington D.C., US.
- Camara G., Souza R.C.M., Freitas U.M. & Garrido J. (1996) Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, **20**, 395–403.
- Catherine A., Mouillot D., Maloufi S., Troussellier M. & Bernard C. (2013) Projecting the Impact of Regional Land-Use Change and Water Management Policies on Lake Water Quality: An Application to Periurban Lakes and Reservoirs. *PLoS One*, **8**, 1-11.
- Collins H.M. & Evans R. (2007) *Rethinking Expertise*, University of Chicago Press, Chicago, US.
- Congalton R.G. & Green K. (2009) *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, CRC Press, Florida, US.
- Cooke G.D., Welch E.B., Peterson S.A. & Nichols S.A. (2005) *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*, CRC Press, Florida, US.
- Czembor C.A. & Vesik P.A. (2009) Incorporating between-expert uncertainty into state-and-transition simulation models for forest restoration. *Forest Ecology and Management*, **259**, 165–175.
- Dai J.J., Lorenzato S. & Rocke D.M. (2004) A knowledge-based model of watershed assessment for sediment. *Environmental Modelling & Software*,

19, 423–433.

Dragičević S., Lai T. & Balram S. (2015) GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat International*, **45**, 114–125.

E.P.A. (1972) Federal Water Pollution Control Act (Clean Water Act - CWA). US.

Eastman J.R. (1999) Geographical Information Systems: principles, techniques, management and applications. In: *Geographical Information Systems*. (Eds P.A. Longley & M.F. Goodchild & D.J. Maguire & D.W. Rhind), pp. 493-502. Abridged, New York, US.

Eastman J.R. (2012) *IDRISI Selva Tutorial*, Clark Labs-Clark University, Worcester.

Eastman J.R., Jin W., Kyem P.A.K. & Toledano J. (1995) Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **61**, 539-547.

Ferretti V. & Pomarico S. (2013) Ecological land suitability analysis through spatial indicators: An application of the Analytic Network Process technique and Ordered Weighted Average approach. *Ecological Indicators*, **34**, 507–519.

Grimm V., Revilla E., Berger U., Jeltsch F., Mooij W.M., Railsback S.F., Thulke H., Weiner J., Wiegand T. & Deangelis D.L. (2005) Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology. *Science*, **310**, 987-991.

Holdren C., Jones W. & Taggart J. (2001) *Managing Lakes and Reservoirs*, North American Lake Management Society, Madison, US.

Hossain M.S. & Das N.G. (2010) GIS-based multi-criteria evaluation to land suitability modelling for giant prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) farming in Companigonj Upazila of Noakhali, Bangladesh. *Computers and Electronics in Agriculture*, **70**, 172–186.

Hutchinson G.E. (1973) Eutrophication. *American Scientist*, **61**, 269-279.

Jensen J.R. (2006) *Remote sensing of the environment: an earth resource*

perspective, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Johnson L.B. & Gage S.H. (1997) Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, **37**, 113-132.

Jørgensen S.E., Bernard C.P. & Straškraba M. (1992) Ecosystems emerging: toward an ecology of complex systems in a complex future. *Ecological Modelling*, **62**, 1-27.

Jørgensen S.E., Löffler H., Rast W. & Straškraba M. (2005) *Developments in Water Science: Lake and Reservoir Management*, Elsevier.

Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.M. & O'brien W.J. (2000) Integration of lakes and streams in a landscape perspective: the importance of material processing on spatial patterns and temporal coherence. *Freshwater Biology*, **43**, 477-497.

Lillesand T.M. & Kiefer R.W. (2000) *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons, Minnesota, US.

Liu J., Dietz T., Carpenter S.R., Alberti M., Folke C., Moran E., Pell A.N., Deadman P., Kratz T., Lubchenco J., Ostrom E., Ouyang Z., Provencher W., Redman C.L., Schneider S.H. & Taylor W.W. (2007a) Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science* **317**, 1513-1516.

Liu Y., Lv X., Qin X., Guo H., Yu Y., Wang J. & Mao G. (2007b) An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. *Landscape and Urban Planning*, **82**, 233–246.

Lovett A.A. & Appleton K. (2008) Developments in GIS for environmental decision-making. In: *GIS for Environmental Decision-Making*. (Eds A.A. Lovett & K. Appleton), pp. 1-8. CRC Press, New York, US.

Maillard P. & Santos N.A. (2008) A spatial-statistical approach for modeling the effect of non-point source pollution on different water quality parameters in the Velhas river watershed-Brazil. *Journal of Environmental Management*, **86**, 158-170.

Malczewski J. (2004) GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview.

Progress in Planning, **62**, 3–65.

- Mcbride M.F. & Burgman M.A. (2012) What Is Expert Knowledge, How Is Such Knowledge Gathered, and How Do We Use It to Address Questions in Landscape Ecology? In: *Expert Knowledge and Its Application in Landscape Ecology*. (Eds A.H. Perera & C.A. Drew & C.J. Johnson), pp. 11-38. Springer, New York, US.
- Moore J.W., Schindler D.E., Scheuerell M.D., Smith D. & Frodge J. (2003) Lake eutrophication at the urban fringe, Seattle region, USA. *Ambio*, **32**, 13-18.
- Morris G.L. & Fan J. (1998) *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill Book Co., New York, US.
- Pearce J.L., Cherry K., Drielsma M., Ferrier S. & Whish G. (2001) Incorporating expert opinion and fine-scale vegetation mapping into statistical models of faunal distribution. *Journal of Applied Ecology*, **38**, 412-424.
- Pettorelli N., Laurance W.F., O'brien T.G., Wegmann M., Nagendra H. & Turner W. (2014) Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of Applied Ecology*, **51**, 839-848.
- Phua M. & Minowa M. (2005) A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. *Landscape and Urban Planning*, **71**, 207–222.
- Polyakov V., Fares A., Kubo D., Jacobi J. & Smith C. (2007) Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 1617–1627.
- Reynolds K.M., Jesen M., Andreasen J. & Goodman I. (2000) Knowledge-based assessment of watershed condition. *Computers and Electronics in Agriculture*, **27**, 315–334.
- Saaty T.L. (2008) Decision-making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, **1**, 83-98.
- Scheffer M., Redelijkheid M.R. & Noppert F. (1992) Distribution and dynamics of

- submerged vegetation in a chain of shallow eutrophic lakes. *Aquatic Botany*, **42**, 199-216.
- Schindler D.W., Hecky R.E., Findlay D.L., Stainton M.P., Parker B.R., Paterson M.J., Beaty K.G., Lyng M. & Kasian S.E.M. (2008) Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *PNAS*, **105**, 11254-11258.
- Schmoldt D.L., Kangas J. & Mendoza G.A. (2001) Basic principles of decision making in natural resources and the environment. In: *Managing Forest Ecosystems: The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making*. (Eds D.L. Schmoldt & J. Kangas & G.A. Mendoza & M. Pesonen), pp. 1-13. SRS Publication, Nederland.
- Silva V.B.S., Morais D.C. & Almeida A.T. (2010) A Multicriteria Group Decision Model to Support Watershed Committees in Brazil. *Water Resource Management*, **24**, 4075-4091.
- Smol J.P. (2008) *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective, 2nd Edition*, Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Soranno P.A., Cheruvilil K.P., Webster K.E., Bremigan M.T., Wagner T. & Stow C.A. (2010) Using landscape limnology to classify freshwater ecosystems for multi-ecosystem management and conservation. *BioScience*, **60**, 440-454.
- Soranno P.A., Webster K.E., Cheruvilil K.S. & Bremigan M.T. (2009) The lake landscape-context framework: linking aquatic connections, terrestrial features and human effects at multiple spatial scales. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, **30**, 695-700.
- Store R. & Kangas J. (2001) Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*, **55**, 79-93.
- Straškraba M. (1999) Retention time as a key variable of reservoir limnology. In: *Theoretical reservoir ecology and its applications*. (Eds J. Tundisi & M. Straškraba), pp. 385-410. International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences and Backhuys Publishers, São Carlos, BR.

- Straškraba M. & Tundisi J.G. (1999a) *Guidelines of lake management: Reservoir Water Quality Management*, Kusatsu, JP.
- Straškraba M. & Tundisi J.G. (1999b) Reservoir ecosystem functioning: theory and application. In: *Theoretical reservoir ecology and its applications*. (Eds J.G. Tundisi & M. Straškraba), pp. 565-583. International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences and Backhuys Publishers, São Carlos, BR.
- Svoray T. & Ben-Said S. (2010) Soil loss, water ponding and sediment deposition variations as a consequence of rainfall intensity and land use: a multi-criteria analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35**, 202-216.
- Trotter C.M., Leathwick J.R. & Pairman D. (2001) Spatial information for ecosystem classification, analysis and forecasting. In: *Spatial Information and the Environment*. (Ed P.J. Halls), pp. 7-36. Taylor & Francys, New York, US.
- Tundisi J.G. (1996) Reservoirs as complex systems. *Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science*, **48**, 383-387.
- Tundisi J.G., Matsumura-Tundisi T. & Rocha O. (1999) Theoretical basis for reservoir management. In: *theoretical reservoir ecology and its applications*. (Eds J.G. Tundisi & M. Straškraba), pp. 505-528. Academy of Science & Backhuys Publishers, São Carlos, BR.
- Voogd H. (1983) *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London, UK.
- Walker P.A. & Young M.D. (1997) Using integrated economic and ecological information to improve government policy. *International Journal of Geographical Information Science*, **11**, 619-632.
- Ward A.D., Trimble S.W. & Wolman M.G. (2004) *Environmental Hydrology, Second Edition*, CRC Press, Florida, US.
- Welch E.B., Jacoby J.M. & Lindell T. (2007) *Pollutant Effects in Freshwater: Applied Limnology*, CRC Press, New York, US.
- Wiens J.A. (2002) Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, **47**, 501-515.

Wrede S., Seibert J. & Uhlenbrook S. (2013) Distributed conceptual modelling in a Swedish lowland catchment: a multi-criteria model assessment. *Hydrology Research*, **44**, 318-333.

4.2 Variáveis de Resposta

A princípio as variáveis de resposta a serem utilizadas para a validação do modelo eram o Índice de Estado Trófico (IET), a concentração de clorofila-a, a concentração de fósforo e a concentração de nitrogênio. Entretanto, optou-se pela produção de um IET elaborado por meio de sensoriamento remoto orbital e validado pelas concentrações de clorofila-a e fósforo, obtidas em campo por Macedo (2011). Os procedimentos e resultados são apresentados no próximo capítulo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA, Agência Nacional de Águas (2013) *Dados de referência acerca da outorga do sistema Cantareira*.

Antunes M.A.H., Debiasi P., Costa A.R., Gleriani J.M. (2012) Correção Atmosférica de Imagens Alos/Avnir-2 Utilizando o Modelo 6S. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Cartografia*, **64**, 531-539.

Bukata R.P., Jerome J.H., Kondratyev K.Y., Pozdnyakov D.V. (1995) *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*, CRC Press, Boca Raton, FL.

Cardoso-Silva S., Ferreira P.A.L., Moschini-Carlos V., Figueira R.C.L., Pompêo M. (2016) Temporal and spatial accumulation of heavy metals in the sediments at Paiva Castro Reservoir (São Paulo, Brazil). *Environ Earth Sci* (2016) **75**.

Chavez Jr. P.S. (1996) Image-based atmospheric corrections: Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, p. 1025 – 1036.

DAEE – Hidrologia (2015) *Banco de Dados Hidrológicos do DAEE*.

Duchemin B., Hadria R., Er-Raki S., Boulet G., Maisongrande P., Chehbouni A., Escadafal R., Ezzahar J., Hoedjes J., Karrou H., Khabba S., Mougenot B., Oliso A., Rodriguez J.-C., Simonneaux V. (2006) Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and

- remotely-sensed vegetation indices. *Agric. Water Manage.* **79**, 1–27.
- Eastman J.R. (2015) *TERRSET Tutorial*, Clark Labs-Clark University, Worcester.
- Esteves F.A. (2011) *Fundamentos da limnologia*. Interciência, Rio de Janeiro.
- Ferreira P.A.L., Cardoso-Silva S., Pompêo M., Figueira R.C.L. (2015) Geocronologia e datação por radionuclídeos, um estudo de caso: Represa Paiva Castro (Sistema Cantareira- Mairiporã- São Paulo). In: *Reservoirs Ecology and Interfaces*. (Eds L.M. Pompêo & V. Moschini-Carlos & P.Y. Nishimura & S. Cardoso-Silva & J.C. López-Doval), pp. 109-119, Sao Paulo, BR.
- IBGE - Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (2015) *Manual técnico de pedologia*. IBGE, Rio de Janeiro, 430 p.
- Macedo C.C.L. (2011) *Heterogeneidade espapacial e temporal das águas superficiais e das macrófitas aquáticas do reservatório Paiva Castro (Mairiporã – SP – Brasil)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru.
- McFeeters S.K. (1996) The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1425-1432.
- Meirelles M.S.P., Camara G., Almeida C.M. (2007) *Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais*. EMBRAPA, Brasília, DF.
- Moreira M.A. (2012) *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Editora UFV. Viçosa, MG.
- Netto N.P., Barros L.A.A. (2010) *Uma história visual da construção do Sistema Cantareira*. São Paulo.
- Pereira A.C.F., Galo M.L.B.T., Velini E.D. (2011) Inferência da transparência da água - reservatório de itupararanga/sp, a partir de imagens multiespectrais Ikonos e espectrorradiometria de campo. *Revista Brasileira de Cartografia*, **63**.

- Ponzoni F.J., Shimabukuro Y.E. (2010) *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação*. Ed. Parêntese, São José dos Campos, SP, 136p.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. (1974) Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Proceedings of the Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Whashington: NASA, **1**, 309-317.
- Santos H.G. (2011) *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 67 p.
- Silveira C.F.P., Jardineiro K.S. (2011) Treinamento no uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento para a modelagem espectro espaço temporal de corpos d'água impactados: bacias do Complexo Billings-SP, da Guarapiranga-SP e do Paiva Castro-Mairiporã. *Relatórios de Treinamento Técnico financiado pelo Projeto 4*. Universidade de São Paulo.
- Kirk J.T.O. (2011) *Light and Photosynthesis in aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

4. CONCLUSÃO

O mapa de IET obtido pela razão TM4/TM3 e classificado em categorias de trofia foram validados pelos dados de campo, pois apresentaram o índice Kappa 0,2180 (razoável) para o período chuvoso e 0,6250 (muito bom) para o período seco. Entretanto, deve-se considerar as características intrínsecas das imagens (banda, faixa e resolução espacial) produzidas pelo sensor remoto utilizado, assim como a interferência espectral de outros alvos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, Agência Nacional de Águas (2013) *Dados de referência acerca da outorga do sistema Cantareira*.
- Andreoli C.V., Carneiro C., Gobbi E.F., Cunha C.L.N. (2011) Eutrofização e a estrutura dos estudos. In: *Eutrofização em reservatórios - Gestão preventiva: estudo interdisciplinar na Bacia do Rio Verde*. (Eds C.L.N. Cunha & C. Carneiro, E.F. Gobbi, C.V. Andreoli), p. 27-28, Curitiba, PR.
- Bitencourt M.D. & Mantelli L.R. (2015) Spatial analysis of limnological parameters using remote sensing and geoprocessing: two case studies. In: *Reservoirs Ecology and Interfaces*. (Eds L.M. Pompêo & V. Moschini-Carlos & P.Y. Nishimura & S. Cardoso-Silva & J.C. López-Doval), pp. 160-176, Sao Paulo, BR.
- Branco S.M., Rocha A.A. (1977) *Poluição, proteção e usos múltiplos de represas*. CETESB - São Paulo.
- Branco S.M. (1986) *Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária*. CETESB/ASCETESB - São Paulo.
- Carlson R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology & Oceanography*, **22**, p. 361-369.
- Chavez Jr. P.S. (1996) Image-based atmospheric corrections: Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, p. 1025 – 1036.

CETESBa, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2013. [Internet] 2013; [acesso em 2016 setembro 06]. Disponível em <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/01.pdf>>.

CETESBb, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2013. [Internet] 2013; [acesso em 2016 setembro 06]. Disponível em <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/04.pdf>>.

Congalton R.G., Mead R.A. (1983) A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49**, p. 69-74.

Congalton R.G., Mead R.A. (1991) A review of assessing the accuracy of classification of remote sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **37**, p.35-46.

Congalton R.G., Green K. (2009) *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. 2nd. Ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 183 pp.

Dall'olmo G., Gitelson A. (2005) Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. *Applied Optics*. **44**, p.412-422.

Domingues L.L., Brunkow R.F., Wosiak A.C. (2001) Composição dos grupos de fitoplâncton no Reservatório de Itaipú. In: *Livro de resumos do VII Congresso Brasileiro de Limnologia*. João Pessoa, Paraíba.

Duan H., Zhang Y., Zhang B., Song K., Wang, Z. (2007) Assessment of Chlorophyll-a Concentration and Trophic State for Lake Chagan Using Landsat TM and Field Spectral Data. *Environ Monit Assess*, **129**, p.295–308.

Elachi C. (1987) *Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing*. Nova York, USA.

EMPLASA, Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo AS.

Metrópoles em Dados, 2000. [Internet] 2000; [acesso em 2016 de agosto 06]. Disponível em < www.emplasa.sp.gov.br/metrodados.htm>.

EMPLASA, Empresa Metropolitana de Planejamento da grande São Paulo S.A. Metrôpoles em dados, 2008. Disponível em: <<http://www.emplasa.sp.gov.br/metrodados.htm>>.

Esteves F.A. (2011) *Fundamentos da limnologia*. Interciência, Rio de Janeiro.

Eastman J.R. (2015) *TERRSET Tutorial*, Clark Labs-Clark University, Worcester.

George D.G., Malthus T.J. (2011) Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in series of lakes in north Wales. *The Science of the Total Environment*, **268**, p. 215-226.

Giatti L.L. (2000) *Reservatório Paiva Castro Mairiporã - SP Avaliação da Qualidade da Água sobre Alguns Parâmetros Físicos Químicos e Biológicos (1987/1998)*. Tese (Mestrado em Saúde Ambiental) - Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Gitelson A.A., Kondratyev K.Y. (1991) Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. *International J. Remote Sensing*, **12**, p. 373–385.

Gons H.J., Rijkeboer M., Ruddick K.G. (2002) A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal Waters. *J. Plankton Res.* **24**, p. 947-951.

INPEa, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016) Os satélites LANDSAT 5 e 7. [Internet] 2016; [acessado em 2016 novembro 08]. Disponível em <http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php>.

INPEb, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2016) Catálogo de imagens. [Internet] 2016; [acessado em 2016 novembro 08]. Disponível em <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>.

Lamparelli M.C. (2004) *Graus de trofia em corpos d'água de estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. Tese (Doutorado). IB. USP, São Paulo, 2004.

- Landis J.R., Koch G.G. (1997) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. **33**, p. 159-174.
- Macedo C.C.L. (2011) *Heterogeneidade espapacial e temporal das águas superficiais e das macrófitas aquáticas do reservatório Paiva Castro (Mairiporã – SP – Brasil)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru.
- Ministério do Meio Ambiente (1986) Resolução CONAMA 20/86.
- Ministério do Meio Ambiente (2005) Resolução CONAMA 357/05.
- Moraes E.C. (2002) *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Moreira M.A. (2012) *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Editora UFV. Viçosa, MG.
- NASA, National Aeronautics and Space Administration (2016) The TM. [Internet] 2016; [acessado em 2016 novembro 08]. Disponível em <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/the-thematic-mapper/>>.
- Netto N.P., Barros L.A.A. (2010) *Uma história visual da construção do Sistema Cantareira*. São Paulo.
- Nishimura P.Y. (2008) *Ecologia da comunidade fitoplanctônica em dois braços da represa Billings (São Paulo, SP) com diferentes graus de trofia*. Dissertação (Mestrado). USP, São Paulo.
- Novaes W (Coord.) (2000) *Agenda 21 brasileira – bases para discussão*. Brasília: MMA/PNUD, 2000.
- Novo E.M.L.M. (2007) Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. São Paulo.
- Novo E.M.L.M., Londe L.R., Barbosa C., Araujo C.A.S., Rennó C.D. (2013) Proposal for a remote sensing trophic state index based upon TM/Landsat

images. *Rev. Ambient. Água*, **8**, p. 65-82.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (1998) *Data oper.* São Paulo: Governo do Estado de São Paulo – Secretaria de Energia e Saneamento.

Senra J.B. (2011) Água, o desafio do terceiro milênio. In: *O Desafio da Sustentabilidade um debate socioambiental do Brasil* (Eds G. Viana, M. Silva, N. Diniz, São Paulo: Fundação Perseu Abamo, p.133-144.

Tambara V.T. (2013) *Simulação do metabolismo em um reservatório subtropical de altitude integrado à bacia hidrográfica*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS.

Thiesen G.M., Oliveira D. (2010) Apresentação de um novo método de mapeamento geomorfológico de detalhe e sua viabilidade de aplicação como subsídio à compreensão da paisagem ocupada no Entorno do reservatório Paiva Castro-Mairiporã/sp. *Anais XVI Encontro Nacional dos Geógrafos*. Rio Grande do Sul.

Tundisi J.G., Matsumura Tundisi T. (2008) *Limnologia*. São Paulo. Editora Oficina de Textos.

Townsend C.R., Begon M., Harper J.L. (2008) *Fundamentos em Ecologia*. Blackwell Publishing, p. 162.

USGS, United States Geological Survey (2016) *Landsat Project Description*. [Internet] 2016; [acessado em 2016 novembro 08]. Disponível em <http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php>.

Valderrama J.G. (1981) The simultaneous analysis of nitrogen and phosphorus in natural waters. *Marine Chemistry*. **10**, p.109-122.

Yacobi Y.Z., Moses W.J., Kaganovsky S., Sulimani B., Leavitt B.C., Gitelson A.A. (2011) NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study. *Water Research*, **45**, p. 2428-2436.

Whately M., Cunha P. (2007) *Cantareira 2006 - um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo/SP: "Resultados do Diagnóstico Socioambiental Participativo do Sistema Cantareira"*. São Paulo. Instituto Socioambiental, p. 68.

Wetzel R.G., Likens G.E. (1991) *Limnological Analyses*. Springer-Verlag, p. 391.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bittencourt S. & Gobbi, E.F. (2006) Carga máxima de fósforo admissível ao reservatório Piraquara II, uma aplicação do processo TMDL. *Revista Bras. Ci. Solo*, **30**, 595-603.
- Cilliers, P. (1998) *Complexity and postmodernism*. Understanding complex systems. Routledge, London, UK.
- Cilliers, P. (2005) Complexity, deconstruction and relativism. *Theory, Culture and Society*, **22**, 255–267.
- Cilliers P., Biggs H.C., Blignaut S., Choles A. G., Hofmeyr J. S., Jewitt G.P.W., Roux D.J. (2013) Complexity, modeling, and natural resource management. *Ecology and Society*, **18**, 3-1.
- Christofoletti, A. (1999) *Modelagem de Sistemas Ambientais*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Congalton R.G., Mead R.A. (1991) A review of assessing the accuracy of classification of remote sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **37**, p.35-46.
- Congalton R.G., Green K. (2009) *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. 2nd. Ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 183 pp.
- Eastman J.R., Jin W., Kyem P.A.K., Toledano J. (1995) Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **61**, 539-547.
- Eastman J.R. (1999) Geographical Information Systems: principles, techniques, management and applications. In: *Geographical Information Systems*. (Eds P.A. Longley & M.F. Goodchild & D.J. Maguire & D.W. Rhind), pp. 493-502. Abridged, New York, US.
- Eastman J.R. (2015) *TERRSET Tutorial*, Clark Labs-Clark University, Worcester.
- Jørgensen S.E. (1995) Complex ecology in the 21st century. In: *Complex Ecology*:

- The Part-Whole Relation in Ecosystems (Eds. Patten, B.C., Jørgensen, S.E., Auerbach, S.I.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 17-19.
- Levin S.A. (1999) *Fragile dominion: complexity and the commons*. Perseus Books, Reading, Massachusetts, USA.
- Landis J.R., Koch G.G. (1997) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. **33**, p. 159-174.
- Macedo C.C.L. (2011) *Heterogeneidade espapacial e temporal das águas superficiais e das macrófitas aquáticas do reservatório Paiva Castro (Mairiporã – SP – Brasil)*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Faculdade de Engenharia, Bauru.
- Majdandzic A., Podobnik B., Buldyrev S.V., Kenett D.Y., Havlin, S., Eugene Stanley H. (2013) Spontaneous recovery in dynamical networks. *Nature Physics*. **10**: 34–38.
- Moreira M.A. (2012) *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. Editora UFV. Viçosa, MG.
- Rocha L.M. (1999). Complex Systems Modeling: Using Metaphors from Nature in Simulation and Scientific Models. *BITS: Computer and Communications News*.
- Saaty T.L. (2008) Decision-making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, **1**, 83-98.
- Sayama H. (2015) *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. Open SUNY Textbooks, Milne Library State University of New York, USA.
- Soranno P.A., Cheruvilil K.P., Webster K.E., Bremigan M.T., Wagner T. & Stow C.A. (2010) Using landscape limnology to classify freshwater ecosystems for multi-ecosystem management and conservation. *BioScience*, **60**, 440-454.
- Voinov A.A. (2008) *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*. Academic Press, CA, USA.
- Wu J., Marceau D. (2002) Introduction Modeling complex ecological systems: an

introduction. *Ecological Modelling*, **153**, 1–6.

ERRATA

Conclusões Gerais

O Capítulo I fundamenta e propõe a integração do MCE e AHP em ambiente de SIG, visando aumentar a sofisticação e a confiabilidade das informações geradas, sem aumentar a complexidade de modelos de tomada de decisão, além da integração da Limnologia e Paisagem como conceito fundamental.

O Capítulo II apresenta o modelo conceitual e descreve as etapas para a sua elaboração, incluindo a seleção das variáveis preditoras e de resposta, além da ponderação destas variáveis por especialistas. O modelo conceitual conseguiu preencher as lacunas oriundas da multidisciplinaridade que envolve o estudo dos sistemas complexos, assim como a multidisciplinaridade dos especialistas.

O Capítulo III apresenta os Mapas Temáticos (variáveis preditoras e de resposta espacializadas), assim como as etapas para a sua produção (pré-processamento, álgebra matricial, índices, padronização e classificação).

O Capítulo IV apresenta a criação e a validação do Mapa Índice de Estado Trófico (IET) obtido por meio de imagens orbitais Landsat-5 (período seco e chuvoso). A validação do IET ocorreu por meio de dados empíricos coletados em datas próximas às das imagens de satélite. Foi obtido Índice *Kappa* Razoável para o período chuvoso e Índice *Kappa* Muito Bom para o período seco.

No Capítulo V o Modelo de Fragilidade Ambiental para o Processo de Eutrofização Antrópica foi rodado e validado pelas concentrações de fósforo obtidas em duas campanhas de campo (seco e chuvoso) em datas próximas às das imagens de satélite utilizadas, apresentando Índice *Kappa* Boa para ambos os períodos avaliados.

O modelo de tomada de decisão aqui desenvolvido e validado permitiu inferir o grau de fragilidade ambiental do Reservatório Paiva Castro no que tange o processo de eutrofização antrópica, com potencialidade para seu uso em outros reservatórios tropicais. O foco na bacia de captação, a abordagem multidisciplinar e a participação de especialistas na ponderação das variáveis preditoras apontam o sucesso do modelo, que pode ser adaptado a diferentes situações. O sucesso maior ou menor de cada situação depende da exploração adequada dos dados disponíveis.

Resumo

Os sistemas naturais e humanos são considerados sistemas integrados, com interações complexas e de caráter fortemente multidisciplinar. A abordagem da limnologia da paisagem, como um princípio holístico para avaliar as relações complexas entre a bacia de captação e o reservatório, é de grande importância na produção de diagnósticos consistentes. O modelo de tomada de decisão aqui desenvolvido e validado permitiu inferir o grau de fragilidade ambiental do Reservatório Paiva Castro ao processo de eutrofização antrópica. Foi produzido por meio de literatura especializada, conhecimento de especialistas, Processo Hierárquico Analítico (AHP) e Avaliação Multicritério (MCE), e desenvolvido para atuar em escala da paisagem, considerando a bacia de captação como janela observacional. Foram selecionados sete critérios (variáveis preditoras) para determinar o grau de fragilidade ambiental para o processo de eutrofização antrópica em reservatórios tropicais: Variáveis Intrínsecas do Reservatório: (1) morfometria (profundidade) e Tempo de Retenção (RT); (2) Variáveis Limnológicas: Zona Eufótica e presença de macrófitas de crescimento intensivo; (3) Variáveis Antrópicas: Fonte de Poluição Difusa Potencial; e (4) Variáveis Hidrológicas: Taxa de Sedimentação e Escoamento Superficial Potencial. Apesar dos critérios e pesos serem fixos para os reservatórios tropicais, existe a possibilidade de ajuste do modelo de acordo com situações especiais, já que o modelo é flexível suficiente para ser utilizado em outras bacias de captação, com características diferentes e intrínsecas. O modelo também é adaptável em função da disponibilidade de base de dados.

Palavras-chave: Sistema Complexo, Modelo de Tomada de decisão, Sensoriamento Remoto, Análise Espacial, Bacia de Captação

Abstract

The human and natural systems are integrated systems, with complex interactions and a strong multidisciplinary character. The application of landscape limnology, as a holistic principle to address the complex relationships between the watershed and reservoir, are of great importance to produce consistent diagnoses and predictions. The GIS-based model here developed and validated, allowed to infer the environmental fragility to human-induced eutrophication in the Paiva Castro Reservoir. The model was performed by using literature, expert knowledge, Analytical Hierarchy Process (AHP) and Multi-Criteria Evaluation (MCE), considering the watershed as the observational scale. We selected seven criteria (predictor variables) to assess the environmental fragility to human-induced eutrophication in tropical reservoirs: (1) Intrinsic Reservoir Variables: morphometry (depth) and Retention Time (RT); (2) Limnological Variables: euphotic zone and intensive-growth macrophytes presence; (3) Anthropic Variable: Potential Non-Point Source (NPS); and (4) Hydrological Variable: Sedimentation Rate and Potential Runoff. Although the criteria and its weights are considered fixed for any tropical reservoir, it is possible to adjust them according to specific situations since the model proposed is flexible enough to be used in different watersheds with different and intrinsic characteristics and adapted according to the database availability.

Keywords: Complex System, Decision-Making Process, Environmental Fragility, Remote Sensing, Spatial Analysis, Watershed