

SIG aplicado a modelagem numérica de parâmetros limnológicos em salinas solares

Lucivan Dantas de Sena Medeiros¹
Diego Emanuel Moreira da Silva¹
Renato de Medeiros Rocha¹
Diógenes Félix da Silva Costa¹

¹Laboratório de Monitoramento Ambiental / Departamento de Geografia
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Campus de Caicó)
Rua Joaquim Gregório, s/n, Penedo, 59.300-000, Caicó-RN, Brasil.
lucivanlabesa.ufrn@gmail.com; diegoemanoel.labesa@yahoo.com.br;
renatoaio@yahoo.com.br; diogenesgeo@gmail.com

Abstract. The solar salterns are marine ecosystems composed of a series of interconnected tanks (evaporators), providing a variety of different salinities, from the sea water to saturation sodium chloride. Therefore, this article proposes the application of spatial modeling method TIN (*triangular Irregular Network*) to evaluate the characteristics of limnological parameters, focusing on integrated management based on the importance of monitoring in relation to managing the risks of eutrophication on salt Miramar. The methodological step succeeded in creating two grids modeling, one triangular and one rectangular. For the triangular grid TIN was chosen "Delaunay" type, with line breaks, a rectangular grid was generated using interpolation. The method allowed to the spatial variation of the parameters of salinity, pH, dissolved oxygen, chlorophyll a, Nitrate, Nitrite, Ammonia, Total Nitrogen and Total Phosphorus. The analysis of these parameters proved to be representative for the different evaporators, which are appropriated to monitor the effectiveness of management strategies saline. Spatial variation of the method was evaluated characteristics of limnological parameters, showing the same patterns, resulting in an integrated management for enabling efficient due to the importance of monitoring in relation to risk control eutrophication.

Palavras-chave: limnological parameters, spatial modeling, integrated management, modelagem espacial, parâmetros limnológicos, gestão integrada.

1. Introdução

As salinas solares são ecossistemas marinhos compostos por uma série de tanques interconectados (evaporadores), que fornecem uma variedade de ambientes com diferentes salinidades, a partir da água do mar até a saturação o cloreto de sódio Javor (1989). Com a translocação (transporte) da água nos tanques há um consequente aumento da salinidade a partir da evaporação, a salmoura é bombeada ou passada por gravidade para o próximo tanque, nos quais a salinidade é mantida dentro de curtos intervalos de variação, sendo essencialmente constante. Assim, cada evaporador pode ser considerado em equilíbrio de biota, com as comunidades adaptadas e estabelecidas em relação a salinidade Predrós-Alió et al. (2000).

As razões iônicas que apresentam maior expressividade nas águas continentais são atribuídas frequentemente em estudos hidrogeoquímicos às razões rMg^{+2}/rCa^{+2} e rK^{+}/rNa^{+} , onde nas águas salinas este comportamento se apresenta de forma diferencial, justamente pela dissolução de sais do próprio embasamento ou *inputs* no sistema Custódio e Llamas (1983). As características hidrogeoquímicas das salmouras das salinas variam bastante em todo o mundo, onde estas variações dependem da localização geográfica, estação do ano, práticas de gestão, e muitos outros fatores Oren (2000). Validando que embora estes sistemas apresentem amplos estudos, são poucos trabalhos sobre a vertente da gestão da salmoura e a própria elaboração de métodos e técnicas que auxiliem Laborde (1983); Davis (2009).

Todavia, inúmeras técnicas que visam e elaboram métodos de análises temporais e espaciais têm sido aplicadas a fim de identificar os diferentes tipos de habitats em seus respectivos ecossistemas: Dufrene e Legendre, 1997; Wetzel e Likens, 2000; Margalef, 2002; Murtaugh e Pooler, 2006. No entanto as salinas brasileiras, necessitam de um sistema de gestão que implante procedimentos de monitoramento integrado sobre as características bióticas e abióticas do meio, desenvolvendo assim ferramentas voltadas para estes tipos de áreas úmidas Costa (2013).

Portanto, entre várias razões e procedimentos de análises espaciais em salinas, podem ser citadas principalmente a necessidade de um plano de monitoramento hidrogeoquímico, avaliação do fluxo da salmoura, avaliação de flutuações das condições de produção de sal ao longo do tempo, e englobando características gerais e integradas a caracterização e avaliação dos condicionantes ambientais na produção de sal Oren (2000); Davis (2009). Portanto, este artigo propõe a aplicação do método de modelagem espacial TIN (*TriangularIrregular Network*) para avaliar as características dos parâmetros limnológicos, focando em uma gestão integrada em função da importância do monitoramento em relação ao controle dos riscos da eutrofização.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida na Salina Miramar, localizada no município de Areia Branca-RN (litoral semiárido nordestino), nas coordenadas 4°57'34,01"S e 37°6'40,23"O, com uma área total de 2.000 hectares.

2.1 Plotagem dos postos de amostras

A plotagem dos pontos foi desenvolvida na Salina Miramar, localizada no município de Areia Branca-RN (litoral semiárido nordestino), nas coordenadas 4°57'34,01"S e 37°6'40,23"O, com uma área total de 2.000 hectares. Sendo distribuídos 05 pontos na extensão da salina, afim de corresponder as zonas de evaporação e concentração, que corresponde diretamente aos evaporadores, concentradores e cristalizadores.

2.3 Plotagem de pontos e criação de grades geométricas

Para a avaliação da viabilidade da técnica de modelagem espacial no monitoramento dos parâmetros hidrogeoquímicos para criar os modelos em SIG, foi utilizado o *software* SPRING 5.1.6 Camaraet al. (1996).

Esta etapa sucedeu em criar duas grades de modelagem, uma triangular e outra retangular. Para a grade triangular – TIN (*Triangular Irregular Network*) foi escolhido o tipo “Delaunay”, com linha de quebra, com as seguintes referências, nível de tolerância entre as linhas = 16,0, a distância entre isolinhas = 320,0 e tolerância de linhas de quebra = 16,0. Assim resultando na definição da triangulação com menor margem de 3,2 metros.

Posterior a etapa de definição da triangulação e a resultante do processo, foi elaborado a grade retangular, com base em dados numéricos da grade triangular (TIN), utilizando um interpolador do tipo “linear”. Considerando a área da salina (2.10^7 m^2), foi selecionado o valor de 50 metros (erro admissível < 20 m, escala 1:100.000) para o eixo X e Y, com pixel de 250 m² na imagem resultante, em tonalidade cromal (adotando valores cromáticos em falsa cor). Finalizando, a grade representa uma série de valores para cada pixel localizado entre os pontos de amostra, gerando uma modelagem numérica que resulta em uma falsa coloração, sendo atribuído um nível de tonalidade cromático em falsa cor delimitado na elaboração do TIN.

3. Resultados e discussão

Sendo uma característica quase que padronizada nas salinas solares brasileiras, é a relação tanto aos setores de evaporação, concentração e cristalização do sal (circuito da salmoura) quanto da estrutura, segmentado nas paredes de contenção e na profundidade dos tanques, variando nas salinas apenas as dimensões dos tanques Costa et al. (2013). Mostrado pela análise do circuito da salmoura na dispersão por TIN, a salinidade apresentou um gradiente espacial ao longo de todos os evaporadores, iniciando com valor de 40 g/L no setor de evaporação inicial, a NE da salina, e tendo um aumento gradual deste valor para 230 g/L no setor de concentração final, W da salina (Figura 1a). Costa et al. (2013) adotaram em segmentação da área de salinas a variável de divisão em 02 zonas: zonas de evaporação e concentração; onde estas zonas foram ainda subdivididas em 03 setores: inicial, intermediário e final, como já abordado por outros autores pioneiros (ex. Davis, 2000; Oren, 2009; Costa, 2013). Neste segmento aplicado a esta salina, a Figura 1a retrata um modelo clássico desta distribuição setorial,

mostrando claramente o setor de evaporação inicial, com valores entre 40 a 60 g/L, intermediário de 60 a 100 g/L e final de 100 a 160 g/L. Em seguida, o setor inicial da zona de concentração apresenta-se com valores iniciais de 100 a 160 g/L, intermediário de 150 a 200 g/L, e o final contendo a solução de salmoura nos tanques apresentando valores acima de 200 g/L. Neste setor, toda solução de salmoura é deslocada para pequenos tanques (cristalizadores) para o término do processo para a precipitação final de cloreto de sódio.

A Figura 1b mostra a variação espacial do pH, sendo correlato a esta distribuição uma variação de 7,4 a 8,5, associado-sea este percentual na zona de evaporação, no setor inicial ao próprio pH da água de captação (água do mar), no setor intermediário e final à própria diminuição da solução aquosa, a SE da salina. Na zona de concentração os valores se comportaram de forma estável e com padrão retilíneo, sendo no setor inicial e intermediário a variação do pH de 7,8 a 7,5, e no setor final a diminuição do pH para 7,4, isso em resposta aos íons do Na⁺ e Cl⁻ não participarem da reação de hidrólise e o pH ser resultante da própria solução aquosa, assim o meio permanece neutro.

A zona de evaporação apresenta taxa elevada de oxigênio dissolvido, sendo quase homogêneo (7,7 $\mu\text{g/L}$ a 5,7 $\mu\text{g/L}$), isso associado à taxa de oxigenação da água de captação proporcionando assim condições regulares ou toleráveis a presença da biota aquática, juntamente associada à taxa de concentração de sais (40 g/L), sendo esse *habitat* tolerado por muitos organismos aquáticos, como por exemplo, peixes (Figura 1c). Na zona de concentração, há uma gradual redução do oxigênio (4,9 $\mu\text{g/L}$ a 2,2 $\mu\text{g/L}$), isso em resposta as características de concentração de sais por L^{-1} , explicado pela redução da solução aquosa oxigenada, a salmoura, e pela profundidade dos tanques. Nesta zona, há uma diminuição expressiva do número de organismos aquáticos que conseguem tolerar as condições físico-químicas do meio, sendo essa expressividade aumentada gradualmente, de acordo com o percentual da concentração de sais por L^{-1} tendo apenas a presença no estágio final (acima de 200 g/L) dos organismos halotolerantes Margalef (2002).

Na Figura 1d a variação espacial da Clorofila *a* na zona de evaporação nos setores inicial e intermediário variou de 0,0 $\mu\text{g/L}$ a 0,65 $\mu\text{g/L}$, no setor final da evaporação os valores variaram de 0,65 $\mu\text{g/L}$ a 1,3 $\mu\text{g/L}$. Na zona de concentração os valores mostraram variação significativa nos setores inicial de 1,3 $\mu\text{g/L}$ a 0,65 $\mu\text{g/L}$ e intermediário, tendo variações de 1,3 $\mu\text{g/L}$, 0,65 $\mu\text{g/L}$ e 0,0 $\mu\text{g/L}$, apresentando um gradual alternância nos valores, já no setor final, de cristalização, os valores de Clorofila *a* apresentaram-se de forma homogênea (0,45 $\mu\text{g/L}$).

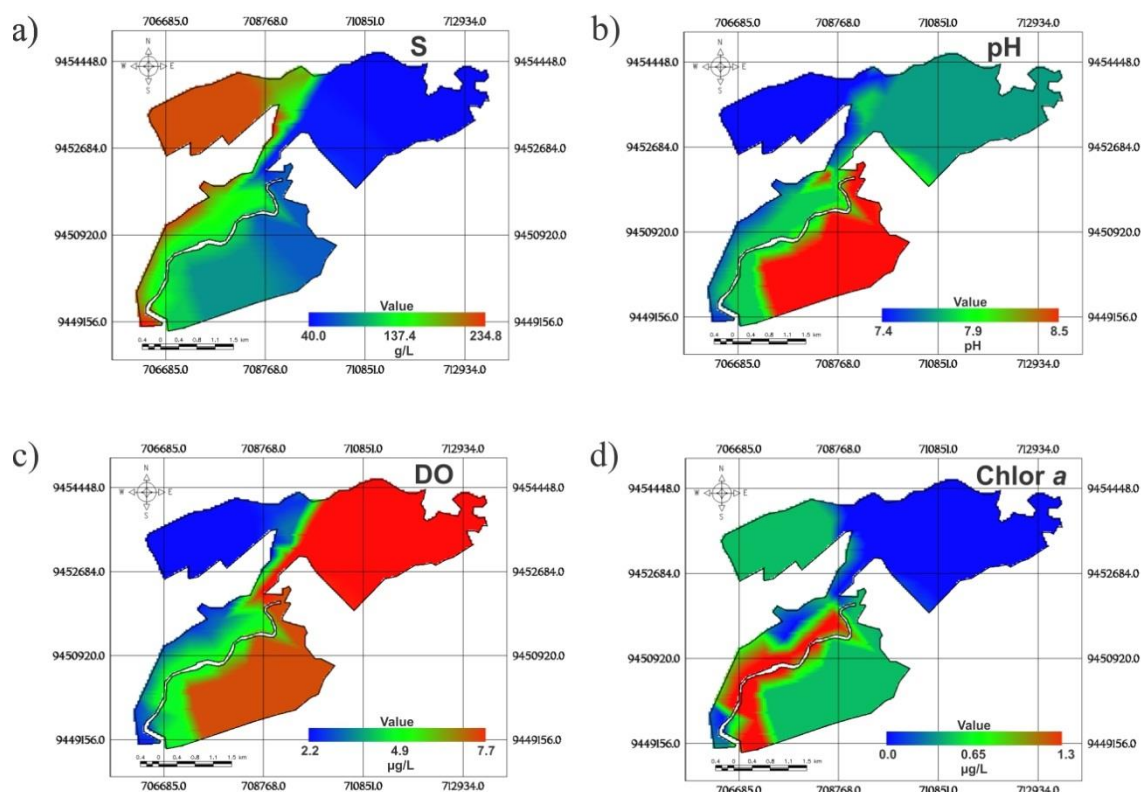


Figura 1. Salinidade (a), pH (b), oxigênio dissolvido (c), Clorofila *a* (d). pH - Potencial hidrogeniônico; OD - Oxigênio dissolvido.

A análise da variação espacial dos valores da série nitrogenada demonstra-se de forma particular a este meio, pois deve-se considerar as características da capacidade de diluição/degradação dos compostos nitrogenados, sendo uma associação bem particular aos parâmetros hidrogeoquímicas da salina Gomes et al. (2013). Na Figura 2a, o Nitrato

está associado respectivamente a própria concentração da água de captação (0,0 µg/L a 1,0 µg/L), onde se distribui quase que homogêneo pela extensão da zona de evaporação, tendo um aumento nos teores no estágio final da evaporação, variando de 2,5µg/L a 5,0 µg/L. Na zona de concentração, no setor inicial os valores variam de 2,5 µg/L a 5,0µg/L, com uma gradual diminuição apresentando de forma homogênea até o estágio final.

Na Figura 2b, a presença de teores de nitrito estão respectivamente associados ao *input*, ou seja, da entrada de água, possivelmente estes teores (60,6µg/L a 44,4 µg/L) estão interligados as características sedimentológicas da própria descarga do oceano, captada pela salina e gradualmente é acumulada em pequenas frações no substrato da zona de evaporação enquanto em suspensão (fundo do tanque) Carloni et al. (2010) atribui que o nitrito é uma forma pouco estável do nitrogênio, que aparece durante processos de mudança de potencial *redox* nestes ambientes. No estágio final da zona de evaporação, há uma redução desses teores (55µg/L a 50 µg/L), em resposta à diminuição do volume da solução aquosa. Na zona de concentração, no setor inicial há uma variação de 44,4µg/L a 34,4 µg/L, tendo um pequeno aumento no setor intermediário para 44,4 µg/L, e no setor final um aumento localizado de 60,6 µg/L com abrupta redução do teor, em resposta a profundidade e concentração de sais, assim aumentado a taxa de degradação da série nitrogenada. A presença da série nitrogenada na zona de concentração desde o estágio inicial ao final está interligado ao fato dos nutrientes dissolvidos e em suspensão da solução da salmoura.

A presença de nutrientes (nitrato e nitrito) no estágio final do circuito da salmoura não é de respectivo interesse, pois a critério disso o produto final de interesse das salinas é o Cloreto de Sódio (NaCl), sendo englobado o nitrato e nitrito como uma impureza no produto final.

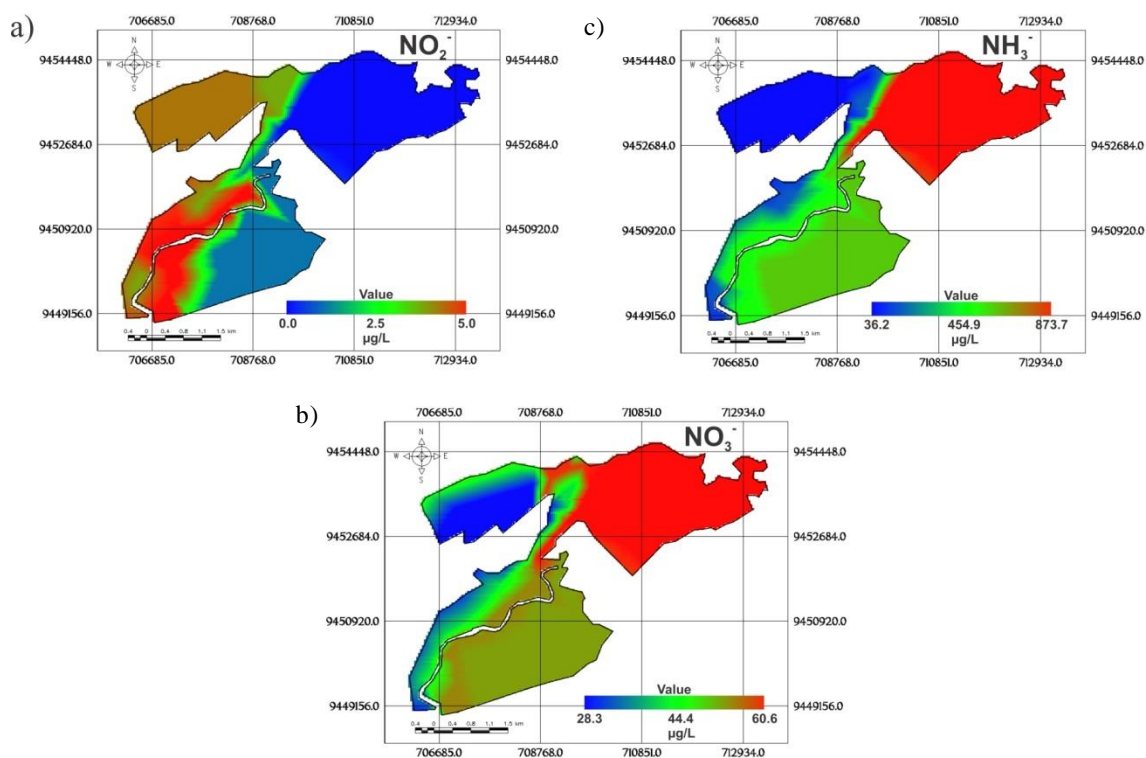


Figura 2. Variação espacial de NO₂(a), variação espacial de NO₃(b), variação espacial de NH₃(c). NO₂⁻ - Nitrato; NO₃⁻ - Nitrito; NH₃ - Amonia.

Também influenciando diretamente a série nitrogenada na eutrofização da água, criando sérios riscos na eficiência do sistema produtivo, os nutrientes derivados da série Nitrogenada total (nitrogênio total) na Figura 3a apresentou uma variação espacial na zona de evaporação de 119,7 $\mu\text{g/L}$ no setor inicial (área captação d'água), apresentando apenas variações isoladas de frações de 194,5 $\mu\text{g/L}$, nos setores intermediário e final da evaporação os valores apresentaram uma variação constante e homogênea de 269,4 $\mu\text{g/L}$. Na zona de concentração os valores apresentaram uma variação de 269,4 $\mu\text{g/L}$ a 194 $\mu\text{g/L}$ no setor inicial, no setor intermediário variando de 269,4 $\mu\text{g/L}$, 194,5 $\mu\text{g/L}$ e 119,7 $\mu\text{g/L}$, já no setor final, nos cristalizadores os valores apresentam uma dispersão homogênea (119,7 $\mu\text{g/L}$).

Como mencionando no parágrafo anterior, o fósforo total (Figura 3b) é um dos principais nutrientes na eutrofização juntamente com nitrogênio. Na zona de evaporação no setor inicial, os valores variaram de 138,9 $\mu\text{g/L}$ a 200 $\mu\text{g/L}$, nos setores intermediário e final os valores tiveram uma variação de 230,1 $\mu\text{g/L}$, 138,9 $\mu\text{g/L}$ e 47,7 $\mu\text{g/L}$. Na zona de concentração os valores nos setores inicial e intermediário variaram de 47,7 $\mu\text{g/L}$ a 138,9 $\mu\text{g/L}$, apresentando uma distribuição heterogênea no setor final os valores apresentaram uma gradual alternância com valores de 138,9 $\mu\text{g/L}$ e 67,7 $\mu\text{g/L}$.

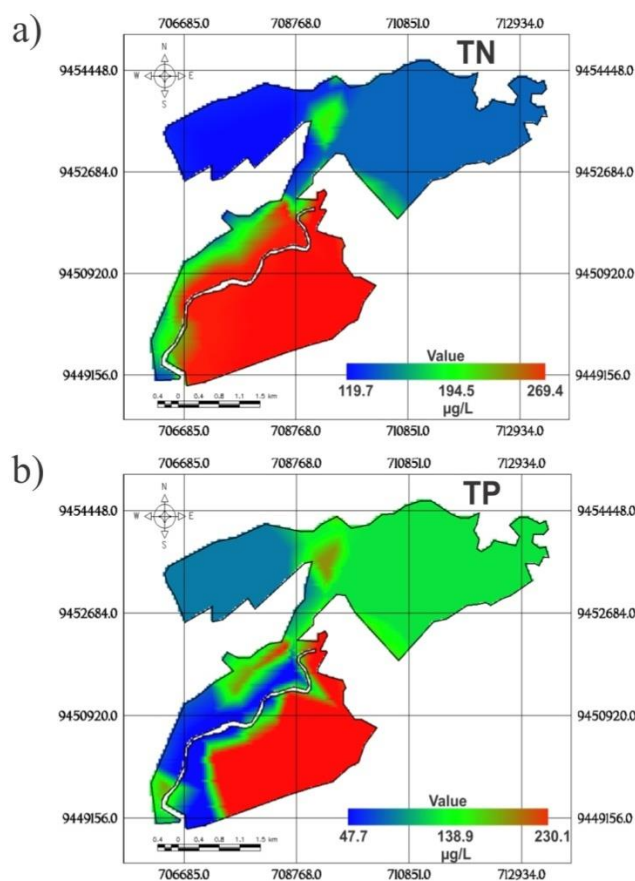


Figura 3. Variação espacial dos valores de Nitrogênio Total (a), Variação espacial dos valores de Fósforo Total (b).

4. Conclusões

O método TIN (*Triangular Irregular Network*) demonstrou uma aplicabilidade eficiente na distribuição e dispersão dos parâmetros, apresentando a variação gradual dos valores de acordo com a dispersão dos pontos e o cálculo matemática digital no

software, assim possibilitando fazer a variação dos valores em uma tonalidade gradual sendo perceptível a mudança tonal e as respectivas variações espaciais na salina.

A análise destes parâmetros mostrou ser representante em os diferentes evaporadores, sendo apropriadas para monitorar a eficácia das estratégias de gestão da salina. Conforme identificado nos resultados, os gradientes dos parâmetros limnológicas pelo método TIN possibilitou um eficiente monitoramento sobre a qualidade da água e os condicionantes dos mesmos. O uso da modelagem possibilitou especializar os parâmetros analisados e identificar as potencialidades de riscos à eutrofização, como a identificação do aporte de nitrato e nitrito nos estágios intermediário e final (cristalizadores) da zona de concentração da salina Miramar.

Portanto, são inúmeros os trabalhos que tratam sobre uma gestão eficiente das salinas apenas tratando características ambientais, onde as novas ferramentas como as geotecnologias aplicadas à projeções de parâmetros limnológicas, em específico o uso de Sistemas de Informações Geográficas a esses parâmetros é algo novo, que possibilita a dispersão e monitoramento dos padrões limnológicas deste meio, e o próprio circuito da salmoura criando projeções com tonalidades graduais mostrando a distribuição e a qualidade d'água. OTIN pôde avaliar as características dos parâmetros limnológicos, apresentando os padrões dos mesmos, resultando em uma viabilização eficiente para gestão integrada em função da importância do monitoramento em relação ao controle dos riscos da eutrofização.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Monitoramento Ambiental (LAMA-CERES-Campus de Caicó) pelo apoio logístico e instrumental nos trabalhos de campo e de gabinete.

Referência bibliográfica

Amorim, E. P. **Avaliação da Concentração de Metais e outros Elementos de Interesse em amostras de Sedimentos dos estuários de Santos São/Vicente e Cananéia, Estado de São Paulo, Brasil.** 2012. 336 p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

Carlioni, F. B. B. A.; Wasserman, J. C. W.; Pereira, L. F. M.; Moreira, M. F. Mudanças na qualidade da água uma laguna do leste fluminense, geradas pela abertura permanente de conexão com o mar. **Geochimica Brasiliensis**. v. 24, n.1, p. 29-40, 2010.

Cairns, J.; McCormick, P.V.; Niederlehner, B.R. A proposes framework for developing indicators ofecosystem health. **Hydrobiologia**, v. 236, p. 1-44, 1993.

Camara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: integrating remote sensing and GIS byobject-oriented data modelling. **Computares& Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Costa, D. F. S. **Caracterização Ecológica e Serviços Ambientais Prestados por Salinas Tropicais.** 2013. 206 p. Tese (Doutorado em Biologia) – Universidade de Aveiro, Aveiro. 2013.

Custódio, E.; Llamas, M.R. **Hidrologia Subterrânea.** Barcelona: Editora Omega, 1983. 506 p.

Davis, J. S. Management of biological systems for continuously operated solar saltworks. **Global Nest Journal**, v. 11, n. 1, p. 73-78, 2009.

Dufrene, M.; Legendre, P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. **Ecological Monographs**, v. 67, p. 345–366, 1997.

Esteves, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3ª Ed. Rio de Janeiro, Interciência. 460 p.

Gomes, O. V. O.; Marques, E. D.; Souza, M. D. C.; Silva-Filho, E. V. Influência antrópica nas águas superficiais da cidade de Três Rios, (RJ). **Geochimica Brasiliensis**. v. 27, n.1, p. 77-86, 2013.

Goltzman, H. L.; Clymo, R. S.; Ohnstad, M. A. **Methods for physical and chemical analysis of freshwaters**. London: Blackweel Sci. Publ., 1978.

Javor, B. J. **Hypersaline environments** - Microbiology and biogeochemistry. New York: Springer Verlag, 1989.

Margalef, R. La Superfície del planeta y la organización de la Biosfera: reacción a los nuevos mecanismos añadidos por el poder creciente de los humanos. Munibe: **Ciencias Naturales, NaturZientziak**, n. 53, p. 7-14, 2002.

Murtaugh, P. A.; Pooler, P. S. Evaluating ecological indicators: lakes in the northeastern United States. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 119, p. 83–96, 2006.

Laborde, M. E. Computer model for the area and performance of solar ponds. **6th Symp. Salt**, v. 11, p. 301–311, 1983.

Oren, A. Salts and brines. In: Whitton, B. A.; Potts, M. (eds). **Ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, p 281–306.

Pedrós-Alió, C.; Calderón-Paz, J. I.; MacLean, M. H.; Medina, G.; Marrasé, C.; Gasol, J. M.; Guixa-Boixereu, N. The microbial food web along salinity gradients. **FEMS Microbiol Ecol**, v. 32, p. 143–155, 2000.

Wetzel, R. G.; Likens, G. E. **Limnological analysis**. New York: Springer-Verlag, 2000. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE 6547.