

Análise Espacial da Clorofila-*a* no Reservatório de Ibitinga/SP Utilizando Métodos de Interpolação

Carolline Tressmann Cairo¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
carolline.cairo@inpe.br

Resumo: A clorofila-*a* (*chl-a*) é um parâmetro importante na avaliação do estado trófico de ambientes aquáticos e, conseqüentemente, utilizado no monitoramento da qualidade da água. Sua distribuição e variabilidade espacial em um corpo d'água podem ser obtidas por meio de métodos de interpolação. O objetivo do presente estudo é analisar a distribuição espacial da concentração da *chl-a* no reservatório de Ibitinga/SP utilizando métodos de interpolação, por meio de um SIG, e verificar a eficiência dos modelos utilizados. Como metodologia, utilizou-se o método de interpolação determinístico da média ponderada pelo inverso do quadrado da distância e o método de interpolação geoestatístico de krigagem, aplicando no final um fatiamento arco-íris. Para avaliar o desempenho dos modelos foi utilizado o RMSE. Observou-se pelos resultados que o método da krigagem conseguiu melhor espacializar a concentração de *chl-a* ao longo do reservatório. Além disso, concluiu-se que a região do reservatório de Ibitinga que mais precisa de atenção no monitoramento da qualidade da água se localiza entre a foz do rio Jacaré-Pepira e a barragem.

Palavras-chave: interpolation method, eutrophication, water quality monitoring, método de interpolação, eutrofização, monitoramento da qualidade da água.

1. Introdução

O grau de trofia dos reservatórios vem sendo drasticamente alterado por mudanças das condições ambientais decorrentes das atividades antrópicas, promovendo e intensificando o processo de eutrofização nesses ambientes aquáticos. A eutrofização das águas continentais está relacionada principalmente com o aumento da população, da industrialização e do uso de fertilizantes químicos na agricultura, sendo que todos esses fatores resultam na liberação de nutrientes, como fosfato e nitrogênio, que são compostos estimuladores da eutrofização (ESTEVES, 1998). Esse processo prejudica a estabilidade do ecossistema aquático e produz inúmeras alterações na qualidade da água, como a anaerobiose no corpo d'água, mortandade da fauna e aumento da ocorrência de florações (blooms) de algas, sendo que algumas espécies podem produzir toxinas potentes. Tais resultados podem dificultar e aumentar os custos do tratamento da água e levar a conseqüências graves para a saúde pública (AZEVEDO; VASCONCELOS, 2006; RANDOLPH et al., 2008; VON SPERLING, 2005).

Frente a este quadro, cresce a necessidade de monitoramento da qualidade da água e de identificação de pontos críticos do reservatório a fim de subsidiar o planejamento de programas de conservação, gerenciamento e recuperação de represas (SANTOS; FILHO, 2013). Além disso, esse monitoramento é importante para conhecer o estado trófico dos reservatórios, funcionando como uma ferramenta para orientar as políticas ambientais e de saúde pública.

A clorofila-*a* (*chl-a*) é um parâmetro importante na avaliação do estado trófico de ambientes aquáticos. Uma vez que existe em todos os grupos de algas em sistemas marinhos e de água doce, quantificar a concentração de *chl-a* em um corpo d'água é uma forma padrão de monitorar a sua bioprodutividade (DUAN et al., 2007; MOSES et al., 2012).

A quantificação da concentração de *chl-a* em corpos d'água pode ser realizada por meio de abordagens baseadas em amostragens *in-situ*. Dado o elevado custo e a

morosidade desses sistemas habituais de monitoramento da qualidade da água, a variável medida em campo, embora seja espacialmente contínua, é amostrada de forma esparsa e pontual durante as campanhas de campo. Tal amostragem, muitas vezes, não consegue elucidar e capturar a variabilidade espacial da eutrofização em diferentes regiões de um corpo d'água. De forma a obter uma visão mais realista do comportamento espacial da chl-*a* para o monitoramento da qualidade da água e facilitar a identificação de possíveis padrões espaciais em um ambiente aquático, as observações pontuais e espacialmente irregulares podem ser convertidas em representações matriciais (BARBOSA, 2005). Para gerar essas superfícies é necessário modelar a variabilidade espacial do fenômeno estudado, sendo a interpolação a técnica comumente utilizada para tal finalidade (CAMARGO et al., 2004).

Os modelos que objetivam gerar superfícies a partir de procedimentos de interpolação podem ser determinísticos ou estatísticos. Em ambos modelos de efeitos locais, cada ponto da superfície é estimado a partir da interpolação das amostras mais próximas, sendo que o modelo determinístico utiliza, por exemplo, funções como o inverso do quadrado da distância e o modelo estatístico utiliza um estimador estocástico (CAMARGO et al., 2004). Tais métodos para a geração de representações matriciais a partir de amostras irregularmente distribuídas no espaço estão disponíveis nos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Segundo Medeiros e Câmara (2001), o SIG é utilizado para a integração, processamento e representação dos dados em uma abordagem que leva em consideração a distribuição espacial do fenômeno na modelagem.

Diante do exposto, o presente estudo tem o objetivo de analisar a distribuição espacial da concentração da chl-*a* no reservatório de Ibitinga/SP utilizando métodos de interpolação, por meio de um SIG. Além disso, pretende verificar a eficiência de um modelo determinístico e estatístico na espacialização do parâmetro limnológico em questão.

2. Metodologia de Trabalho

Este trabalho foi desenvolvido no SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), sendo o projeto criado com o datum WGS84 e sistema de projeção UTM.

2.1 Área de estudo

O Reservatório da Usina Hidrelétrica de Ibitinga (Figura 1) está localizado no médio Tietê, região central do estado de São Paulo (21°45' S, 48°59' W). Esse reservatório foi escolhido por ser parte de um sistema em cascata construído ao longo do rio Tietê, que é uma das bacias hidrográficas mais industrializadas e densamente povoadas do Brasil, e onde as questões de qualidade da água são críticas (FILOSO et al., 2003; MARTINELLI; FILOSO, 2008). O rio Tietê recebe esgoto da cidade de São Paulo, a maior região metropolitana da América do Sul. Atualmente, o reservatório é cercado por plantações de cana-de-açúcar. A bacia de drenagem do reservatório é coberta por pastagens, áreas de reflorestamento, citricultura e fragmentos de vegetação nativa desde o trecho médio até as cabeceiras dos seus dois principais afluentes, os rios Jacaré-Guaçu e Jacaré Pepira (GUIMARÃES et al., 1998; LUZIA, 2009). Esta região também tem sido submetida a grande expansão da cana-de-açúcar nos últimos 10 anos (RUDORFF et al., 2010). A bacia do Jacaré-Guaçu é a mais densamente ocupada e menos preservada que a do Jacaré-Pepira (NOVELLI, 1996), recebendo todo o esgoto

da cidade de Ibitinga. A bacia do Jacaré-Pepira, entretanto, pertence a Área de Proteção Ambiental de Ibitinga (APA-Ibitinga) (SIGRH, 2014).

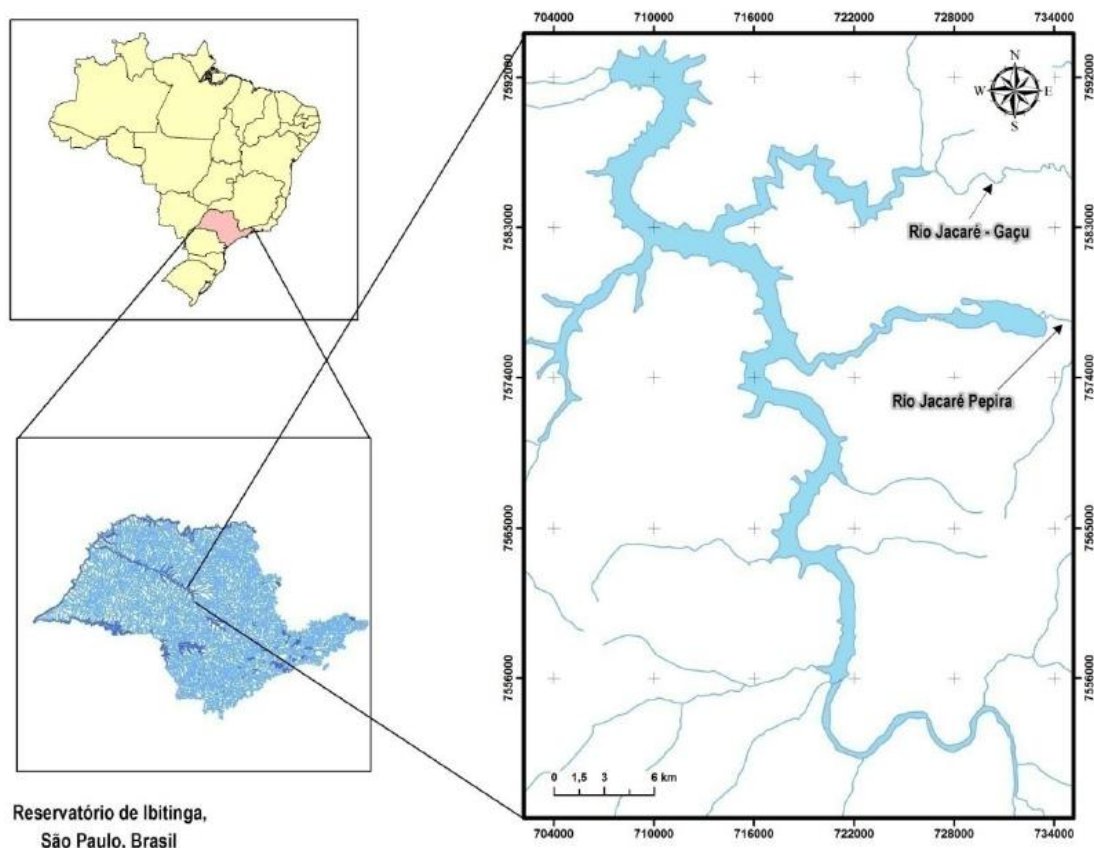


Figura 1 – Localização do reservatório de Ibitinga

2.2 Coleta de dados *in-situ* e determinação da concentração de chl-*a*

A campanha de campo foi realizada por Londe (2008) nos dias 24 a 28 de outubro de 2005, sendo coletadas amostras de água em 51 estações amostrais de montante a jusante no reservatório de Ibitinga (localização das amostras presente na tese da autora). As medições foram feitas em regiões que representassem um gradiente de diferentes concentrações de chl-*a*, com ênfase para os pontos mais eutrofizados do reservatório. As amostras foram filtradas em filtros GF/C com porosidade de 0,45 μm e a metodologia utilizada para a obtenção da concentração de chl-*a* foi a estabelecida por Nush (1980), sendo a extração de pigmentos realizada com solução de etanol 80% a quente. O range de concentrações de chl-*a* obtido no estudo da autora variou de 6,14 à 76.809,84 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.3 Métodos de Interpolação

Os métodos de interpolação utilizados no presente estudo levaram em consideração apenas 46 amostras de concentração de chl-*a* das 51 obtidas nas campanhas de campo, pois na literatura foi verificado um máximo de concentração de chl-*a* de até 9.790 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (GALAT; VERDIN, 1989). Dessas 46 amostras, 34 foram utilizadas para o processo de interpolação e as 12 restantes (escolhidas de forma aleatória de montante a jusante do reservatório) utilizadas como dados para teste, no caso para a comparação entre os métodos de interpolação espacial.

Uma primeira análise exploratória estatística dos dados totais de concentração de chl-*a* mostrou que o gráfico de probabilidade normal acumulado possuiu os pontos com

um ajuste ruim a uma reta. Assim, para que os dados tivessem um bom ajuste em relação à reta, ou seja uma distribuição próxima da normal, houve a necessidade de aplicar uma transformação para se fazer as análises posteriores. A transformação aplicada nos dados foi a log-normal.

Para gerar as superfícies de chl-*a* a partir de procedimentos de interpolação, foi utilizado um método determinístico local e um geoestatístico, conforme descrito em Camargo et al. (2004).

2.3.1 Método determinístico local

Uma alternativa simples para gerar uma superfície bidimensional a partir de amostras pontuais é ajustar uma função bidimensional sobre as amostras consideradas, compondo uma superfície cujo valor será proporcional à local intensidade de amostras. A média dos valores das amostras vizinhas é um dos esquemas de interpolação mais simples para a estimação dos valores dos pontos. A formulação geral para este tipo de interpolação esta representada da Equação 1.

$$\hat{z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

Em que z_i é o valor de cota de um ponto i qualquer da grade, z_j é a cota de uma amostra j vizinha do ponto i da grade e w_{ij} é um fator de ponderação.

As variações desse esquema básico são os interpoladores por vizinho mais próximo, por média simples e por média ponderada. Para o presente estudo foi escolhido a interpolação por média ponderada.

Na interpolação por média ponderada, o valor de cota de cada elemento da grade é definido pela média ponderada dos valores de cota das amostras vizinhas. A ponderação mais usada na prática é o inverso do quadrado da distância euclidiana do ponto da grade à amostras considerada (Equação 2).

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^k} \quad (2)$$

Em que k é o expoente da distância, geralmente igual a 1 e 2 (sendo considerado 2 no presente estudo); e d_{ij} é o valor de distância da amostra j ao ponto i da grade, expressa pela Equação 3.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

No presente estudo, para o desenvolvimento da interpolação por média ponderada pelo inverso do quadrado da distância, o raio de influência, que é a distância máxima em que as amostras possuem dependência espacial, foi determinado de acordo com o valor de alcance obtido no semi-variograma (mostrado a seguir).

2.3.1 Método geoestatístico

A geoestatística é uma abordagem probabilística de modelagem, que engloba um conjunto de métodos estatísticos, para a análise e mapeamento de dados distribuídos no espaço e/ou no tempo. O método geoestatístico para a realização da interpolação no presente estudo foi a krigagem ordinária.

A krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial, fornecendo estimadores com propriedades de não tendenciosidade e com um erro mínimo. A hipótese implícita no procedimento geoestatístico é que o processo estudado é estacionário. A estrutura teórica da krigagem é baseada no conceito de variável regionalizada, que é uma variável distribuída no espaço (ou tempo) em que seus valores são considerados realizações de uma função aleatória. Essa teoria permite incluir hipóteses estatísticas em processos espaciais locais.

Burrough (1987) demonstrou que a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: (a) componente estrutural (associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante); (b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e (c) um ruído aleatório ou erro residual. Se o vetor x representa uma posição em 1, 2 ou 3 dimensões, dessa forma o valor da função aleatória Z , em x , é dada conforme Equação 4.

$$Z(x) = \mu(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (4)$$

Em que $\mu(x)$ é um função determinística que descreve a componente estrutural de Z em x , $\varepsilon'(x)$ é um termo estocástico correlacionado (que varia localmente), e ε'' é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal com média 0 e variância σ^2 .

A hipótese mais simples em relação ao comportamento da variável regionalizada é a que a krigagem ordinária abrange. Na hipótese da krigagem ordinária, a média do fenômeno ($\mu(x)$) é constante na região de estudo, sendo denotada por m . Assim, o valor esperado da função aleatória Z nas posições x e $x+h$ é igual a m . Isso faz com que o valor esperado da diferença entre os valores observados em x e $x+h$, separados por um vetor de distância h , seja nulo (Equação 5).

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \quad (5)$$

Além disso, admite-se que o fenômeno considerado é estacionário de segunda ordem, ou seja, que a covariância entre dois pares quaisquer $Z(x)$ e $Z(x+h)$, separados por um vetor de distância h , existe e depende unicamente de h (Equação 6).

$$C(h) = COV [Z(x), Z(x+h)] = E [Z(x) \times Z(x+h)] - m^2 \quad (6)$$

De maneira adicional, a estacionaridade da covariância implica na estacionaridade da variância (Equações 7 e 8).

$$Var(Z(x)) = E [Z(x) - m]^2 = E [Z^2(x)] - 2E [Z(x)].m + m^2 \quad (7)$$

Ou ainda

$$Var(Z(x)) = E[Z^2(x)] - 2m.m + m^2 = E[Z^2(x)] - m^2 = C(0) \quad (8)$$

Dessa forma, verifica-se que as hipóteses de média constante e estacionaridade da covariância fazem com que a determinação da função $C(h)$ seja suficiente para caracterizar a variável regionalizada. Assim, levando em consideração a Equação 4, a função $C(h)$ permite caracterizar o termo estocástico $\varepsilon'(x)$. Para determinar $C(h)$, utiliza-

se uma função auxiliar, conhecida como função variograma $2\gamma(h)$, definida na Equação 9, e desenvolvida nas Equações 10 e 11.

$$2\gamma(h) = E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (9)$$

$$2\gamma(h) = E[Z^2(x) - 2Z(x)Z(x+h) - Z^2(x+h)] \quad (10)$$

$$2\gamma(h) = E[Z^2(x)] - 2E[Z(x)Z(x+h)] - E[Z^2(x+h)] \quad (11)$$

Das Equações 7 e 8, obtêm-se, respectivamente, as Equações 12 e 13.

$$E[Z(x)Z(x+h)] = C(h) + m^2 \quad (12)$$

$$E[Z^2(x)] = E[Z^2(x+h)] = C(0) + m^2 \quad (13)$$

Substituindo as Equações 12 e 13 na Equação 11, obtêm-se a Equação 14.

$$2\gamma(h) = 2C(0) - 2C(h) \quad \text{ou} \quad \gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (14)$$

Em que $\gamma(h)$ representa o semivariograma, que é metade do variograma. A relação na Equação 14 indica que sob a hipótese de estacionaridade de 2ª ordem a covariância e o semivariograma são formas alternativas de caracterizar a autocorrelação dos pares $Z(x)$ e $Z(x+h)$, separados pelo vetor h .

Na modelagem geoestatística, os passos seguidos em um estudo empregando técnicas de krigeagem incluem: (a) análise exploratória dos dados; (b) análise estrutural (modelagem de estrutura de correlação espacial); e (c) interpolação estatística da superfície.

A análise exploratória dos dados é realizada por meio de estatísticas univariadas e bivariadas. As estatísticas univariadas fornecem um meio de organizar e sintetizar um conjunto de valores, que se realiza principalmente por meio do histograma. As principais características do histograma são (COSTA NETO, 1977): (a) medidas de localização: média, valor mínimo, quartil inferior, mediana, quartil superior e valor máximo; (b) medidas de dispersão: variância e desvio padrão; e (c) medidas de forma: coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e coeficiente de variação. As estatísticas bivariadas fornecem formas de descrever o relacionamento entre duas variáveis, podendo ser entre dois conjuntos de dados ou de duas distribuições. Esta relação pode ser visualizada por meio do diagrama de dispersão, sendo que o grau da relação linear entre as variáveis pode ser determinado por meio do coeficiente de correlação.

A etapa da análise estrutural pretende avaliar como a variável em estudo se comporta no espaço de acordo com o semivariograma. Essa parte envolve: (a) geração de semivariograma experimental; (b) ajuste do semivariograma a um modelo teórico; e (c) validação do modelo de ajuste. A determinação experimental do semivariograma, para cada valor de h , considera todos os pares de amostras $z(x)$ e $z(x+h)$, separadas pelo vetor distância h (Equação 15).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (15)$$

Seendo $\hat{\gamma}(h)$ o semivariograma estimado e $N(h)$ o número de pares de valores medidos, $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor h . O semivariograma pode ser determinado estabelecendo uma hipótese adicional de que o fenômeno é isotrópico (com comportamento igual em todas as direções) ou anisotrópico (com comportamento diferente dependendo da direção). No primeiro caso, a determinação experimental do semivariograma depende apenas da distância entre as amostras. No segundo caso, a determinação do semivariograma depende tanto da distância entre as amostras como da direção relativa entre elas. Além disso, os parâmetros do semivariograma (Figura 2) são: (a) alcance: distância dentro da qual as amostras estão correlacionadas espacialmente; (b) patamar: valor do semivariograma correspondente ao alcance, sendo que acima desse valor não existe mais dependência espacial entre as amostras; e (c) efeito pepita: é a componente caótica, um ruído que não explicada nada referente ao dado.

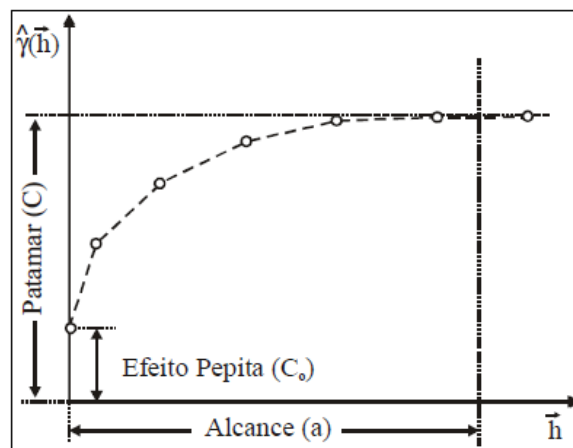


Figura 2 - Parâmetros do semivariograma

Fonte: Camargo et al. (2004)

O próximo passo corresponde a definição do modelo teórico que melhor se ajusta ao semivariograma experimental. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de $\hat{\gamma}(h)$ em relação ao vetor h , assim as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais exatas e, conseqüentemente, mais confiáveis. Os modelos utilizados para o ajuste são: esférico, exponencial, gaussiano e potência. Além disso, nessa etapa há a estimativa dos valores de efeito pepita, alcance, contribuição (quanto o modelo está sendo utilizado para descrever o comportamento do dado) e akaike (reporta para qual modelo o ajuste é mais preciso, sendo quanto mais negativo melhor) para um determinado modelo.

Mesmo após o trabalho de geração do semivariograma experimental e de seu modelo de ajuste, sempre existe um certo grau de incerteza sobre os parâmetros utilizados. Esta incerteza é o erro da estimativa, podendo ser obtido por meio da validação do modelo. Esse processo envolve a re-estimação dos valores conhecidos por meio dos parâmetros ajustados ao modelo do semivariograma.

Não havendo alterações a serem feitas nas análises anteriores, a interpolação estatística da superfície utilizando a krigagem é realizada. Nessa etapa é criada uma grade regular de valores a partir dos dados amostrados e uma superfície da variância da estimativa, sendo que se na análise exploratória dos dados amostrados for constatado um comportamento de distribuição normal essa superfície da variância da estimativa é considerada uma superfície de incerteza da estimativa.

2.4 Análise do erro entre os métodos de interpolação

O desempenho do método de interpolação foi avaliado por comparação dos valores interpolados com os valores separados para teste. Dessa forma, o erro nos resultados da espacialização pelo método determinístico e geostatístico foi calculado pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), presente na Equação 16.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (16)$$

Sendo x_i o valor da concentração de chl-*a* interpolado e \hat{x}_i o valor da concentração da chl-*a* medida *in-situ*.

2.5 Análise espacial da concentração de chl-*a*

Para a análise espacial da concentração de chl-*a* ao longo do reservatório de Ibitinga, a grade regular de valores gerada pelos métodos de interpolação foi transformada em imagem e essa imagem sofreu um processo de fatiamento arco-íris, gerando uma superfície de distribuição contínua de cores.

3. Resultados e Discussão

Pela análise exploratória das 34 amostras da concentração de chl-*a* transformadas para log-normal (Tabela 1, Figura 3) verifica-se uma distribuição aproximadamente simétrica em torno da média, pois a média (2,18) e a mediana (2,04) estão muito próximas. Além disso, o gráfico de probabilidade normal acumulado mostra os pontos com bom ajuste a uma reta, o que indica uma distribuição próxima da normal, mostrando que a transformação log-normal foi eficiente nos dados. O valor da assimetria é baixo (0,20), próximo de zero, indicando uma boa assimetria, e quanto ao grau de achatamento o coeficiente de curtose (2,01) indica que a distribuição é platicúrtica.

Tabela 1 - Análise exploratória: estatística descritiva

Estatística Descritiva	
Número de Pontos	34
Média	2.18
Variância	0.64
Desvio Padrão	0.80
Coefficiente de Variação	0.37
Coefficiente de Assimetria	0.20
Coefficiente de Curtose	2.01
Valor Mínimo	0.79
Quartil Inferior	1.63
Mediana	2.04
Quartil Superior	3.01
Valor Máximo	3.71

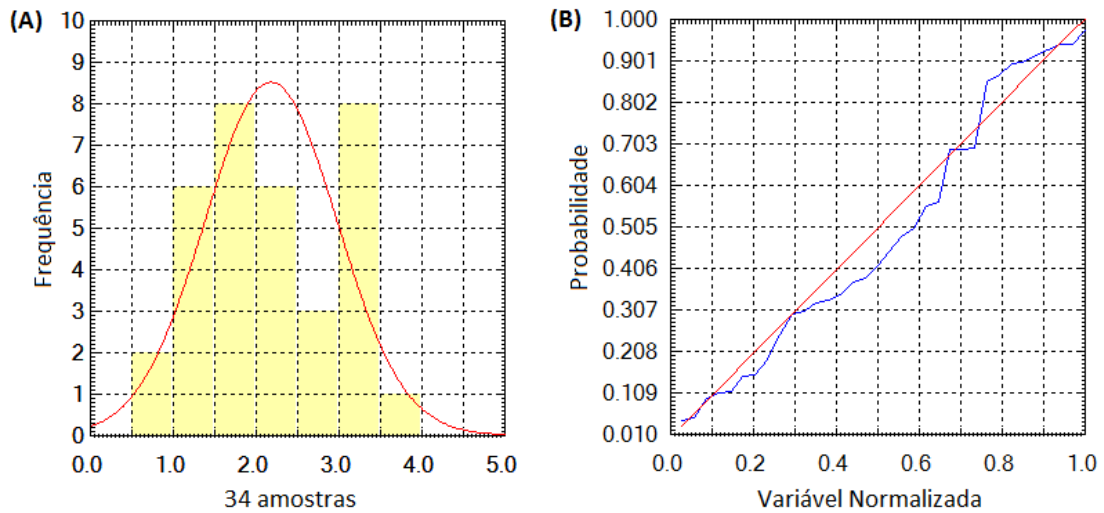


Figura 3 - Análise exploratória: (A) histograma e (B) gráfico da probabilidade normal

Os parâmetros utilizados para a geração da superfície pelo método geoestatístico foram: (a) geração de semivariograma experimental (Figura 4) - nº lags 7; incremento 4.159; tolerância 2.080,5; omnidirecional, (b) ajuste do semivariograma a um modelo teórico (Figura 5) - ajuste visual; modelo do tipo gaussiano, efeito pepita 0,363; contribuição 1,337; alcance máximo e mínimo 30.000; ângulo anis 0°. A etapa de validação do modelo de ajuste (Figura 6) apresentou resultados bons, pelo diagrama de dados observados versus estimados foi possível notar que obteve-se valores próximos a reta de 45° da origem. Vale ressaltar que neste estudo foi considerado que a variabilidade espacial do fenômeno é a mesma em todas as direções, ou seja que o fenômeno tem um comportamento isotrópico, pois o formato do reservatório pode ser um forte fator de indução da anisotropia no desenvolvimento da análise de superfície na etapa de geração do semivariograma experimental.

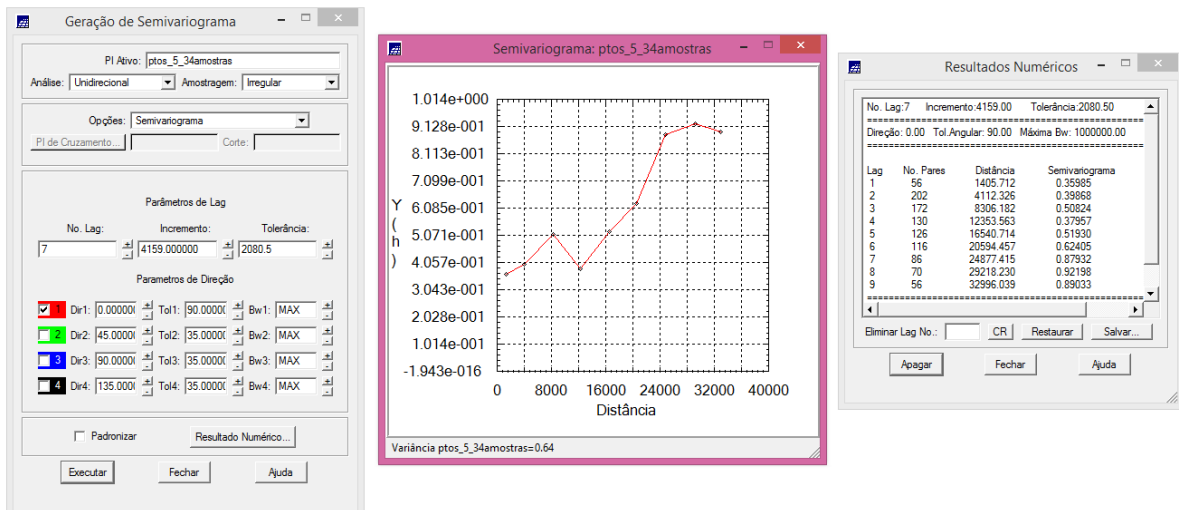


Figura 4 - Geração do semivariograma experimental

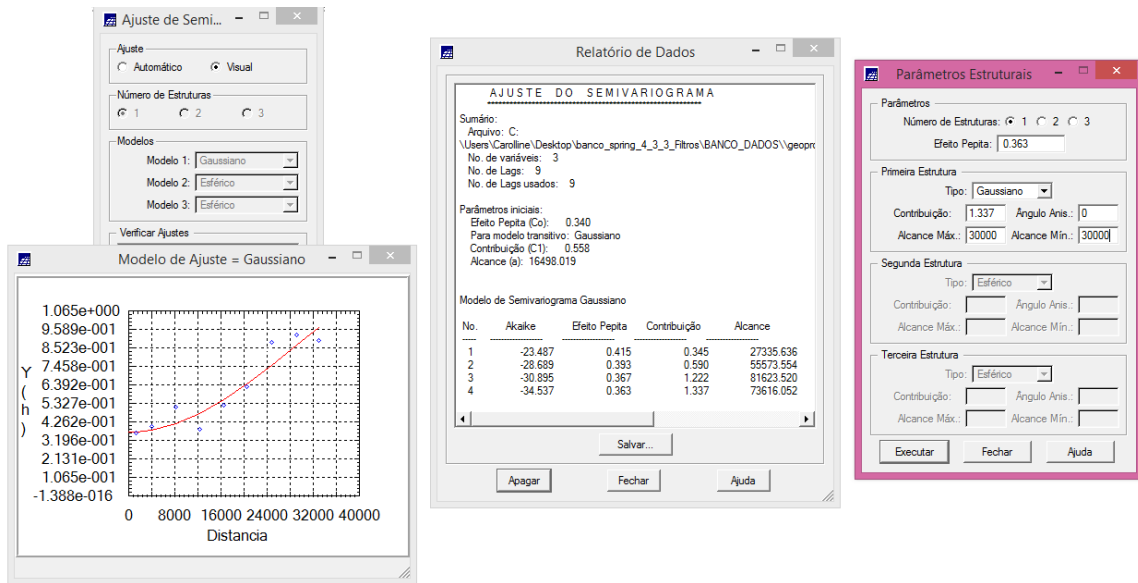


Figura 5 - Ajuste do semivariograma a um modelo teórico

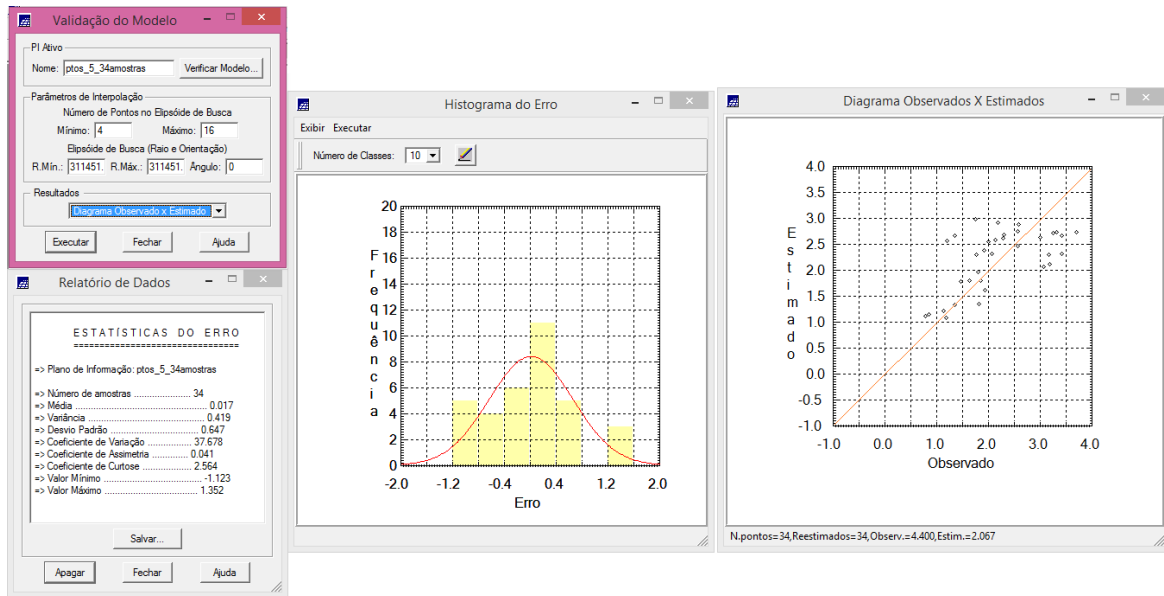


Figura 6 - Validação do modelo de ajuste

Na última etapa, a krigagem ordinária foi aplicada com um número mínimo e máximo do elipsóide de busca de valor 4 e 64, respectivamente. O resultado da interpolação e da superfície da variância da estimativa, com o fatiamento arco-íris aplicado, pode ser visualizado na Figura 7, em que a cor mais vermelha significa maiores valores e a cor mais azul os menores valores da concentração de chl-a. Pela análise visual da superfície gerada (Figura 7A), verifica-se que a concentração de chl-a foi bem espacializada no reservatório, pois faz sentido ter maiores concentrações em locais próximos a barragem e em sinuosidades, principalmente porque os dados amostrais foram coletados em uma época em que o período de residência da água é maior. Maiores concentrações também foram verificadas no rio Jacaré-Guaçu em relação ao Jacaré-Pepira, o que também é esperado, pois a bacia do rio Jacaré-Guaçu tem maior influência antropogênica e a bacia do Jacaré-Pepira possui uma APA. A Figura 7B mostra que ao longo do corpo principal do reservatório a variância dos valores interpolados foi baixa, indicando também boas estimativas pela menor incerteza associada.

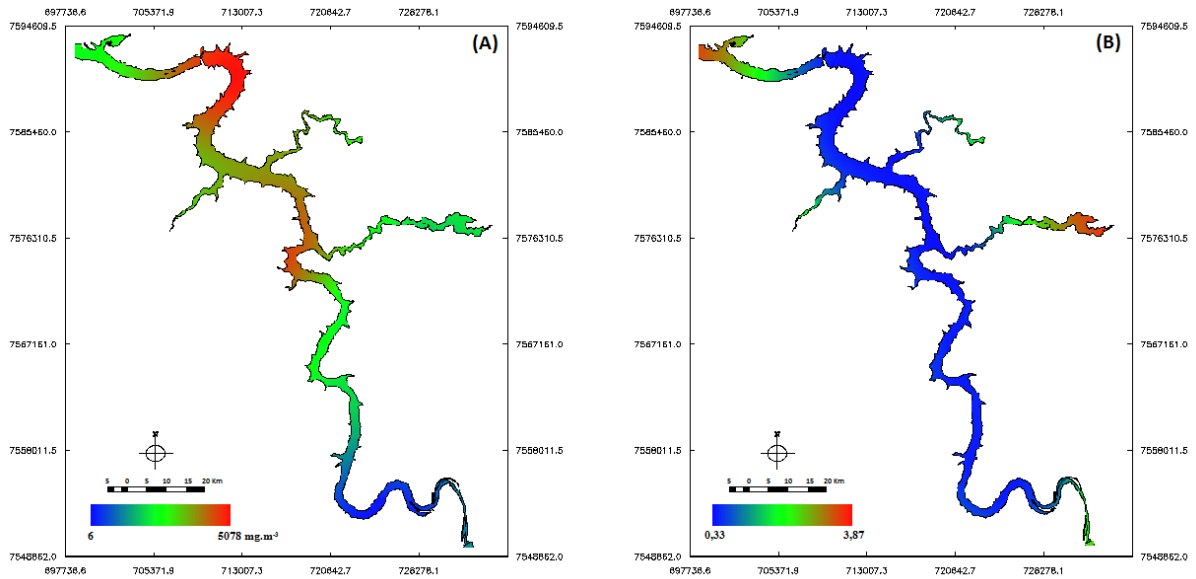


Figura 7 - Resultado da Krigagem: (A) Superfície interpolada e (B) Superfície de variância da estimativa

O resultado da interpolação determinística, utilizando a média ponderada pelo inverso do quadrado da distância, se encontra na Figura 8, com o fatiamento arco-íris aplicado. Vale ressaltar que para a realização deste método foi utilizado um raio de influência igual ao valor do alcance determinado pela análise do semivariograma, no caso 30.000 metros. Pela análise visual da superfície gerada, verifica-se que em alguns pontos teve uma superestimativa de valores, justamente onde houve as maiores concentrações pontuais de chl-*a*.

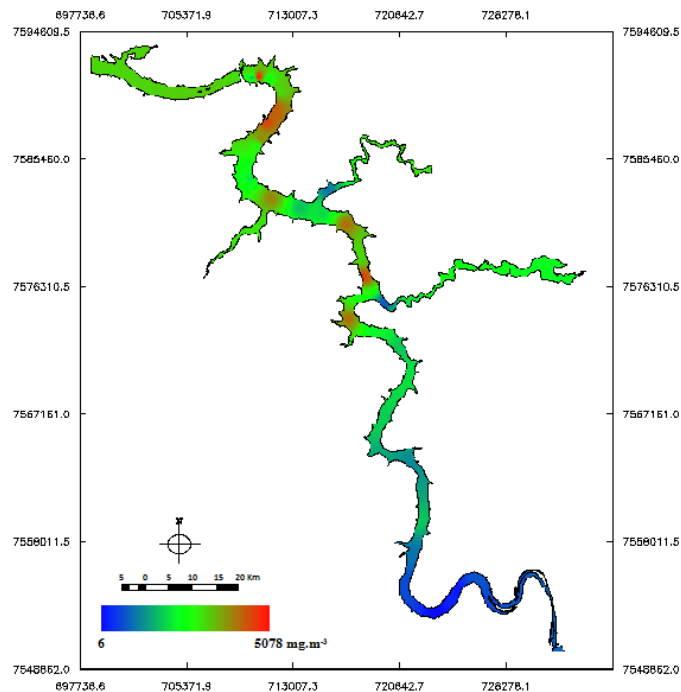


Figura 8 - Resultado da interpolação determinística: média ponderada pelo inverso do quadrado da distância

O cálculo do RMSE mostrou que o método de interpolação por geostatística teve um desempenho um pouco melhor na estimativa da concentração de chl-*a* que o método determinístico, sendo este equivalente a um RMSE de 0,44 e aquele a um RMSE de 0,33.

Embora a diferença entre esses valores seja pequena, é evidente pela análise visual que o método geoestatístico consegue melhor representar a espacialização da concentração de chl-*a* no reservatório, não tendo a presença de valores pontuais super ou sub-estimados. Comparando-se as duas superfícies geradas é possível notar que apenas a parte a montante do reservatório (parte inferior das Figuras 7 e 8) e uma porção do rio Jacaré-Pepira tiveram uma espacialização da chl-*a* semelhante em ambos métodos de interpolação.

4. Conclusões

Os métodos de interpolação, principalmente o geoestatístico, podem ser uma ferramenta estratégica na realização de estudos prévios às campanhas de campo, pois esses métodos podem otimizar o processo de amostragem, conseguindo melhor capturar a variabilidade espacial da eutrofização em diferentes regiões de um corpo d'água. Além disso, podem auxiliar os programas de monitoramento da qualidade da água a partir da indicação dos melhores locais de amostragem, identificação de áreas de maior produtividade e monitoramento e previsão de áreas propícias à ocorrência de blooms.

No presente estudo, percebe-se que a região no reservatório de Ibitinga que necessita de mais atenção em relação ao monitoramento da qualidade da água é a região do meio em direção à jusante, ou seja, da área um pouco antes da foz do rio Jacaré-Pepira até a barragem. Nessa região, as áreas do reservatório com maior sinuosidade e próximas à barragem são locais chaves de amostragem, pois tendem a ter maior ocorrência de blooms, principalmente em elevados períodos de residência da água.

Agradecimentos

Carolline Tressmann Cairo agradece a CAPES pela bolsa de doutorado e à pós-graduação do INPE.

Referências Bibliográficas

- AZEVEDO, S. M. F. O.; VASCONCELOS, V. M. Toxinas de cianobactérias: causas e consequências para a saúde pública. In: P. A. ZAGATTO; EDUARDO BERTOLETTI (orgs.), **Ecotoxicologia aquática - princípios e aplicações**. São Carlos: RiMa, 2006.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 286 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- BURROUGH, P.A. Spatial aspects of ecological data. In: JONGMAN, R.H.; ter BRAAK, C.J.F.; TONGEREN, O.F.R., **Data analysis in community and landscape ecology**. Wageningen, Pudoc, p.213-251, 1987.
- CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. Cap 3. In: **Análise Espacial de Dados Geográficos**. DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds). Brasília, EMBRAPA, 2004.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 264p.
- DUAN, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, B.; SONG, K.; WANG, Z. Assessment of chlorophyll-a concentration and trofic state for lake Chagan Using Landsat TM and field spectral data. **Environ Monit Assess**, 129:295–308, 2007.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência., 2 ed, 602 p, 1998.
- FILOSO, S.; MARTINELLI, L. A.; WILLIAMS, M. R.; LARA, L. B.; KRUSCHE, A.; BALLESTER, M. V.; de CAMARGO, P. B. Land use and nitrogen export in the Piracicaba River basin, Southeast Brazil. **Biogeochemistry** 65 (3): 275 - 294, 2003.

GALAT, D.L.; VERDIN, J.P. Patchiness, collapse and succession of cyanobacterial bloom evaluated by synoptic sampling and remote sensing. **Journal of Plankton Research**, v. 11, p. 925-948, 1989.

GUIMARÃES, C.; LEOPOLDO, P. R.; CRUZ, J. A.; FONTANA, S. C. Aspectos limnológicos do reservatório de Ibitinga – SP. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 3, n. 1, p. 89-103, 1998.

LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2008.

LUZIA, A. P. **Estrutura organizacional do fitoplâncton nos sistemas lóticos e lênticos da bacia do Tietê/Jacaré (UGRHI-Tietê-Jacaré) em relação à qualidade da água e estado trófico**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009. 186 p.

MARTINELLI, L.A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and Social Challenges. **Ecological Applications** 18 (4): 885 - 898, 2008.

MEDEIROS J. S. E; CAMARA G. GIS para estudos ambientais. Cap 10. In: **Introdução à ciência da geoinformação**. Editores: CAMARA, G.; DAVIS. C.; MONTEIRO, A. M.; D’ALGE, J. C.. São José dos Campos, INPE, 2001.

MOSES, W. J.; GITELSON, A. A.; PERK, R. L.; GURLIN, D.; RUNDQUIST, D. C.; LEAVITT, B. C.; BARROW, T. M.; BRAKHAGE, P. Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data. **Water Research**, n 46, 993 - 1004, 2012.

NOVELLI, A.S. **Diagnosis of surface water resources of the hydrographic basin of Jacaré-Guaçu River**. Dissertação de Mestrado (MSc in Environmental Engineering Science) - School of Engineering at São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 1996.

NUSH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Arch. Hydrobiol**, p. 14-39, 1980.

RANDOLPH, K.; WILSON, J.; TEDESCO, L.; LI, L.; PASCUAL, D. L.; SOYEUX, E. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin. **Remote Sensing of Environment**, 2008.

RUDORFF, B. F. T., AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote sensing** 2, no. 4, 1057-1076, 2010.

SANTOS, F. C.; FILHO, W. P. Reflectância espectral relacionada aos constituintes opticamente ativos da água do reservatório Passo Real, RS, Brasil. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** INPE, Foz do Iguaçu, 2013.

SIGRH - Integrated System of Water Resources Management of São Paulo State, 2014. Committee of Jacaré-Pepira Hydrographic Basin - Presentation. Available at: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao>>.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 1, 3 ed, 2005. 452 p.