

Modelagem geoestatística de parâmetros de qualidade da água em lagoa urbana

No processo de desenvolvimento sustentável, o planejamento e a administração dos recursos hídricos são essenciais para uma melhor gestão ambiental. Preocupação com as questões relativas ao meio ambiente sugere que sejam realizadas abordagens sistemáticas relacionadas com o monitoramento dos impactos ambientais. A metodologia geoestatística se apresenta como um método que utiliza procedimentos estatísticos aplicados a situações cujos dados estão relacionados a fenômenos naturais espacialmente distribuídos e correlacionados. Seguindo esta temática, esta pesquisa tem o objetivo de mapear e avaliar a dispersão de alguns parâmetros de qualidade da água na lagoa do rio Barigui, localizado em Curitiba – Paraná. Para a realização desta modelagem, foram coletadas e analisadas amostras de água de 20 pontos em quatro coletas ao longo do ano, para demonstrar o efeito da sazonalidade. Todo o processamento geoestatístico e estatístico foi realizado através do software livre R e o seu pacote de extensão GeoR. Com os resultados obtidos foi possível caracterizar a variabilidade espacial destes parâmetros na lagoa do rio Barigui, demonstrando que a metodologia é eficiente para a gestão de recursos hídricos e monitoramento ambiental em lagoas urbanas.

Palavras-chave: Variabilidade Espacial; Recursos Hídricos; Monitoramento Ambiental.

Geostatistical modeling of water quality parameters in the urban lagoon

In the process of sustainable development, the planning and administration of water resources are essential for better environmental management. Concern about issues related to the environment suggests that systematic approaches related to the monitoring of environmental impacts be carried out. The geostatistical methodology is presented as a method that uses statistical procedures applied to situations whose data are related to spatially distributed and correlated natural phenomena. Following this theme, this research aims to map and evaluate the dispersion of some water quality parameters in the Barigui river lagoon, located in Curitiba - Paraná. To carry out this modeling, water samples were collected and analyzed from 20 points in four collections throughout the year, to demonstrate the effect of seasonality. All geostatistical and statistical processing was performed using the free software R and its GeoR extension package. With the results obtained it was possible to characterize the spatial variability of these parameters in the Barigui River lagoon, demonstrating that the methodology is efficient for the management of water resources and environmental monitoring in urban lagoons.

Keywords: Spatial variability; Water resources; Environmental monitoring.

Topic: **Engenharia de Recursos Hídricos**

Received: **05/08/2020**

Approved: **26/09/2020**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Ivan Rodrigo Leonardi 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8323953064800700>
<http://orcid.org/0000-0003-4732-5972>
ivan.leonardi@hotmail.com

Tais Cristina Filipe 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9617640402863895>
<http://orcid.org/0000-0001-9487-0477>
taisfilipe@gmail.com

Luana Mayumi Takahasi Marques 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8776760707837584>
<http://orcid.org/0000-0002-7844-6999>
luanam@alunos.utfpr.edu.br

Alinne Mizukawab 

Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2763554977026571>
<http://orcid.org/0000-0002-2831-6694>
alimizu@gmail.com

Júlio César Rodrigues de Azevedo 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8987771365126082>
<http://orcid.org/0000-0001-5358-0713>
jcrazevedo@hotmail.com

Maurici Luzia Charnevski Del Monego 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1410424302920222>
<http://orcid.org/0000-0002-9093-3802>
mauriciluzia@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0028

Referencing this:

LEONARDI, I. R.; FILIPPE, T. C.; MARQUES, L. M. T.; MIZUKAWAB, A.; AZEVEDO, J. C. R.; DEL MONEGO, M. L. C.. Modelagem geoestatística de parâmetros de qualidade da água em lagoa urbana. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.5, p.295-308, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0028>

INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de água para diversos fins, aliada a sucessiva degradação dos recursos hídricos é um dos principais problemas ambientais do século atual. Equilibrar esse cenário para não prejudicar gerações futuras é um dos objetivos do desenvolvimento sustentável. Dentro do processo de desenvolvimento sustentável, o planejamento e a administração dos recursos hídricos são essenciais para uma melhor gestão ambiental. Ferramenta deste processo, as bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental para o gerenciamento da qualidade de vida de um ecossistema, uma vez que o equilíbrio hidrológico e biológico deve estar em harmonia (ALBUQUERQUE FILHO, 2003).

O crescente avanço nas pesquisas tem colaborado intensamente com o desenvolvimento de novos programas de monitoramento e avaliação de riscos envolvendo diversos setores do ambiente. Um maior entendimento dos fenômenos ambientais permite o desenvolvimento de métodos cada vez mais eficientes para a análise e tratamento de dados. Além disso, preocupação com as questões relativas ao meio ambiente sugere que sejam realizadas abordagens sistemáticas relacionadas com o monitoramento dos impactos ambientais (MONEGO et al., 2010).

No Brasil, a lei das águas (BRASIL, 1997) incorpora princípios de integração, descentralização e participação, além de instrumentos que focam no planejamento e o ordenamento de usos múltiplos dos recursos hídricos. A resolução do CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005 classifica os corpos hídricos em categorias hierárquicas referente a sua utilização (consumo humano, preservação do equilíbrio natural, recreação, etc.) e estabelece limites para diversos parâmetros de qualidade da água (BRASIL, 2005).

Espacializar e mapear esses parâmetros permite ao leitor uma melhor compreensão do fenômeno estudado e, conseqüentemente, uma melhor tomada de decisão. Atualmente, para mapear e representar diversas variáveis, métodos geoestatísticos comumente estão sendo utilizados para correlacionar informações no espaço e/ou no tempo. A metodologia geoestatística se apresenta como um método que utiliza procedimentos estatísticos aplicados a situações cujos dados estão relacionados a fenômenos naturais espacialmente distribuídos e correlacionados. Em outras palavras, para certa variável, considera-se também a sua posição geográfica expressa por um sistema de coordenadas (DRUCK et al., 2004).

A metodologia geoestatística pode ser utilizada em diversas áreas e muitas pesquisas integraram o método com sucesso: na mensuração da dependência espacial da chuva e erosividade para o Estado do Ceará (RIBEIRO FILHO, et al., 2017); para estimação da temperatura média anual do Estado da Bahia (ALMEIDA, et al, 2017); na variabilidade espacial de bário em área com resíduos da perfuração de poços de petróleo (AMARAL SOBRINHO et al., 2018); na avaliação da acurácia posicional absoluta de dados geoespaciais (SANTOS, 2017); e diversos outros.

Além dessas, existem outras pesquisas aplicadas na área de gestão de recursos hídricos, tais como: no mapeamento da dispersão de efluentes (MONEGO et al., 2010), na criação de modelos espaço-temporais a partir da variabilidade dos parâmetros de índice de qualidade da água (CASTRO JUNIOR et al., 2007), no mapeamento da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos (LISBOA et al., 2016) e como ferramenta de estudo

na batimetria e estimativa da profundidade das águas continentais portuguesas (MACHADO et al., 2003).

Com uma área de aproximadamente 264,84 km², a bacia do Barigui, área de estudo dessa pesquisa, está localizada no primeiro planalto paranaense e intersecta os municípios de Curitiba, Almirante Tamandaré e Araucária. Em sua extensão, a bacia apresenta cobertura vegetal pouco significativa, com um uso do solo predominante de ocupação urbana (FROEHNER et al., 2008).

Principal curso d'água de sua bacia, embora pouco expressivo em vazão, o rio Barigui atravessa áreas intensamente urbanizadas e abastece uma lagoa localizada no segundo maior parque urbano da capital paranaense. Apesar do rio não fornecer água diretamente para a população de Curitiba, sua importância consiste em atender as demandas por água para outros fins menos nobres, porém de total importância para o conjunto hidrográfico. Dentre eles, destacam-se: o equilíbrio ambiental, capacidade de escoamento superficial, atividades industriais, receptor e depurador de dejetos, entre outros (AUER, 2010).

Seguindo esta linha, nesta pesquisa foram coletados e analisados dados ambientais referentes aos indicadores de qualidade da água na lagoa do rio Barigui, como o pH, oxigênio dissolvido, fósforo total, ortofosfato, nitrogênio amoniacal e carbono orgânico dissolvido. Esses parâmetros foram coletados durante as quatro estações do ano e aplicada a modelagem geoestatística para mapear suas dispersões.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a metodologia foi dividida em duas etapas: coleta e análise dos parâmetros de qualidade da água e interpolação dos pontos amostrais utilizando geoestatística. O fluxograma da Figura 1 ilustra os passos que foram realizados.

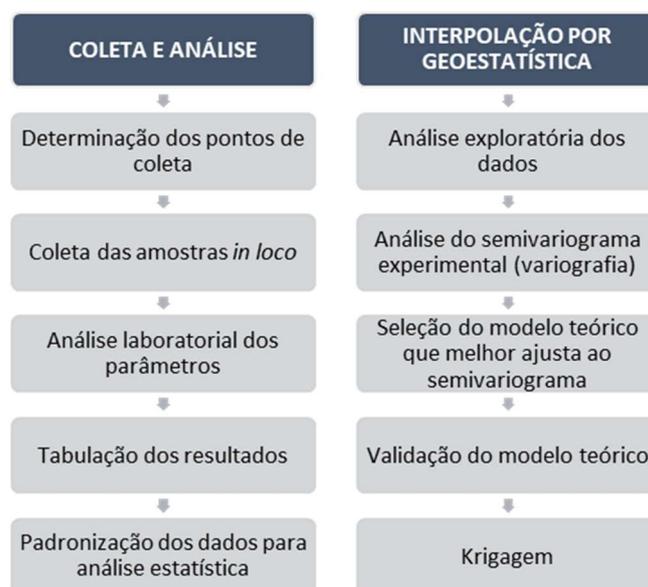


Figura 1: Fluxograma representando as metodologias que foram utilizadas na pesquisa.

Coleta e Análise dos Parâmetros

Para melhor compreensão e interpretação dos fenômenos no espaço e tempo, foram realizadas quatro coletas ao longo do ano, para demonstrar a sazonalidades das estações. Todos os pontos amostrais

foram coletados no interior da lagoa do rio Barigui (Figura 2). Os pontos 1, 2, 3, 4, 6 e 7 estão localizados onde há maior escoamento de água superficial e onde passa o rio Barigui, em direção a Araucária, sendo o ponto 1 a entrada do rio na Lagoa e o ponto 7 a saída. Já os outros pontos localizam-se no interior da lagoa. Na região norte da Lagoa, além de restaurantes instalados próximos aos pontos 16 e 20, há uma área verde pertencente ao parque onde o rio está inserido (parque Barigui).

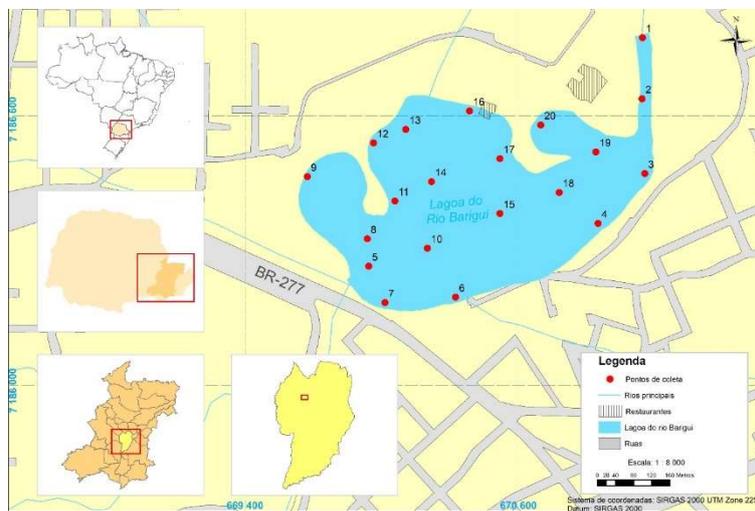


Figura 2: Localização dos pontos de amostragem na lagoa do rio Barigui.

Após a seleção dos pontos amostrais, a próxima etapa foi realizar a coleta das amostras de água. Todos os materiais e equipamentos utilizados nas coletas foram descontaminados previamente com ácido clorídrico 5%. A metodologia de análise seguiu os procedimentos descritos no Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

As quatro coletas foram realizadas todas no período da manhã e corresponderam as quatro estações do ano. A coleta condizente ao outono foi realizada no dia 20 de junho de 2016 durante um chuvisco. No dia 10 de novembro do mesmo ano, realizou-se a coleta da primavera. O dia estava ensolarado e sem chuva, porém, o rio e a lagoa estavam turvos, devido a uma chuva intensa registrada em Curitiba na semana anterior.

A coleta correspondente a estação do verão, aconteceu no dia 28 de março de 2017, durante um dia ensolarado e sem chuvas intensas ocorridas no período. Já a última coleta, referente à estação inverno, foi realizada no dia 12 de setembro do mesmo ano, também com um dia ensolarado e sem aguaceiros ocorridos no período. É importante salientar que as datas das coletas não caracterizam com exatidão a estação do ano. Por motivos de logística do barco, foram as datas passíveis de levantamento.

Em campo, foram realizadas análises de pH e oxigênio dissolvido com a sonda multiparâmetros da marca Hanna, modelo HI9828. Os parâmetros que exigem análise laboratorial, como o fósforo total (PT), ortofostato (PO_4^{3-}), nitrogênio amoniacal ($N - NH_3$) e carbono orgânico dissolvido (COD), foram realizados em laboratório. Todas as amostras, com exceção do fósforo total, foram previamente filtradas em membrana de acetato de celulose de 0,45 μm e todas as análises foram realizadas em triplicata. Para obtenção da concentração destes parâmetros, foram utilizadas as metodologias descritas no Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), sendo o método do fenato para o N-amoniacal e do

ácido ascórbico para o ortofosfato e fósforo total.

Precipitação

Para auxiliar na discussão dos resultados alcançados foram obtidos dados de precipitações diárias (mm) dos anos de 2016 e 2017 que ocorreram na cidade de Curitiba (PR). Estes dados foram disponibilizados pelo Simepar (Sistema Meteorológico do Paraná), e foram importantes para verificar possível estiagem ou cheia nas datas que ocorreram as coletas.

Os índices de precipitação utilizados nesta pesquisa foram coletados na estação meteorológica localizada no Centro Politécnico, campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Os dados registrados estão representados na Tabela 1. Para uma análise mais precisa das informações, optou-se por registrar os dados de precipitação nos cinco dias que antecederam as coletas, considerando também os valores acumulados para o período.

Tabela 1: Precipitação no período das coletas.

	Data	mm	Σ		Data	mm	Σ		Data	mm	Σ		Data	mm	Σ
Coleta 1	15/06/16	0,0	13,2	Coleta 2	05/11/16	0,0	50,0	Coleta 3	23/03/17	0,0	3,4	Coleta 4	07/09/17	0,0	0,0
	16/06/16	0,0			06/11/16	0,0			24/03/17	1,6			08/09/17	0,0	
	17/06/16	0,0			07/11/16	0,0			25/03/17	0,0			09/09/17	0,0	
	18/06/16	0,0			08/11/16	0,0			26/03/17	0,0			10/09/17	0,0	
	19/06/16	9,4			09/11/16	0,6			27/03/17	0,0			11/09/17	0,0	
20/06/16	3,8	10/11/16	49,4	28/03/17	1,8	12/09/17	0,0								

Nota: Σ = precipitação acumulada dos 5 dias antecedentes a coleta (em mm).

Fonte: SIMEPAR (2017).

Interpolação Geoestatística

Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram feitas utilizando o software R e o seu pacote de extensão GeOR (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008). Já as representações temáticas foram elaboradas com o auxílio da versão trial do software ArcGIS 10.5 da Esri.

Análise Exploratória

A análise exploratória dos dados foi o primeiro passo para aplicabilidade da metodologia geoestatística. Esta etapa foi importante para diagnosticar e verificar o comportamento dos dados coletados, principalmente em relação a sua discrepância, distribuição e normalidade (MONEGO et al., 2010). Em outras palavras, permitiu coletar impressões iniciais de possíveis padrões de dependência espacial, identificar a possível ocorrência de valores anômalos, a existência de assimetrias na distribuição e eventual presença de tendências. Desta forma, para cada parâmetro coletado foi calculado: mínimo, mediana, média aritmética, máximo, desvio padrão, medidas de assimetria, medidas de curtose e variância (BUSSAB et al., 2017; PEDROSA, 2016).

Análise e Modelagem do Semivariograma Experimental

Realizada a análise exploratória, foi possível construir o semivariograma experimental da distribuição

dos dados e verificar sua dependência espacial. Nos casos em que houve relação entre distância e semivariância, um modelo matemático que melhor ajuste a este semivariograma foi selecionado para representar o fenômeno. Nesta pesquisa utilizou-se os modelos da família Matérn.

Os modelos da família Matérn é dada por:

$$\gamma(h) = r^2 + \sigma^2 \left\{ 1 - \left([2^{k-1} \Gamma(k)]^{-1} \left(\frac{h}{\phi} \right)^k k_k \left(\frac{h}{\phi} \right) \right) \right\}$$

Onde:

- k : é o parâmetro de suavização do modelo;
- $\Gamma(k)$: é a função Gama; e
- k_k é a função Bessel modificada de ordem k .

Na prática, o parâmetro k pode variar de 0 a infinito. Para $k = 0,5$ o modelo de Matérn reduz-se ao modelo exponencial e para $k = \infty$ equivale ao modelo gaussiano (URIBE-OPAZO et al., 2012), ambos são modelos clássicos utilizados na geoestatística. Para essa pesquisa, os variogramas foram modelados e avaliados utilizando os modelos matemáticos para os diferentes valores de K (0,5, 1,5 e 2,5) para dois tipos de ajustes: mínimos quadrados ponderados (MQP) e máxima verossimilhança (MV).

O método de MQP ajusta-se a partir dos pontos do variograma experimental, enquanto o MV ajusta-se o modelo de variograma a um modelo de distribuição de probabilidade multivariada dos dados (MONEGO et al., 2010). Dessa forma, foram elaborados semivariogramas para todos os parâmetros e coletas. Já para aceitação do melhor modelo, todos passaram por uma metodologia de validação, que é detalhada na sessão 2.2.3.

Validação do Modelo Teórico

A maioria dos métodos de interpolação, seja estocástico ou não, requerem técnicas de confiabilidade que permitem validar o modelo utilizado na determinação das estimativas não amostradas. Por este motivo, nesta pesquisa, foi utilizada a técnica de validação cruzada para seleção do melhor modelo (MONEGO et al., 2010; WACKERNAGEL, 2003).

Esta técnica é muito utilizada para verificar e analisar o desempenho obtido para um novo conjunto de dados. Ela já foi validada em diversos estudos geoestatísticos. Um exemplo de sucesso foi apresentado por Lundgren (2017). Para aceitação, foi verificado qual dos três modelos (k igual a 0,5, 1,5 e 2,5) apresentaram a menor estatística dos erros através dos parâmetros: erro de estimativa; erro médio (EM) mais próximo de zero; raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM) menor possível; e erro quadrático estandardizado médio (EQEM) mais próximo de um (MONEGO et al., 2010; WACKERNAGEL, 2003).

Seleção do melhor modelo e Krigagem

A última etapa foi a escolha do melhor modelo para realizar a interpolação e estimar valores desconhecidos na área de estudo, através da Krigagem ordinária. Após realizar a análise dos resultados para todos os modelos de cada estação do ano (inverno, primavera, verão e outono) obteve-se uma elevada quantidade de informações. Dessa forma, optou-se por resumir o modelo selecionado para a modelagem

geoestatística. Para essa seleção, seguiu-se rigorosamente os critérios: a) Verificada e analisada a estatística dos erros (EM, REQM e EQEM); os modelos que tiveram valores altos, foram automaticamente desconsiderados; b) Obtidos os valores das estimativas dos modelos analisados, foram desconsiderados os que possuíam valores distantes em relação aos registrados na estatística descritiva; c) Analisado os valores de \emptyset (patamar) e A (alcance) dos semivariogramas. Os modelos que registraram valores mais baixos, apresentam variabilidade menor; e d) Elaborados mapas do desvio padrão dos erros. Mapas com valores mais elevados de desvio, foram automaticamente descartados.

Com base na seleção do melhor modelo, a krigagem foi realizada. A Krigagem é um dos processos geoestatísticos mais conhecidos que estima, a partir de pontos amostrais, valores desconhecidos de variáveis no espaço e/ou tempo, com base na análise variográfica. Este processo abrange diversos algoritmos e para estudos no Brasil o mais habitual é a krigagem ordinária (LANDIM et al., 2013).

A equação que representa a krigagem é dada por:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^M \alpha_i Z(x_i)$$

Onde:

- $Z(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, M$ são as observações próximas à x_0 (ponto a ser estimado); e
- α_i , $i = 1, 2, \dots, M$ são os respectivos pesos.

O método de estimativa por krigagem ordinária procura que a média dos erros de estimação seja nula e tenta minimizar a variância dos erros de estimação, sendo estes os pressupostos fundamentais do método (DOSZA et al., 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Exploratória

A análise exploratória foi realizada para cada um dos parâmetros e coletas. As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo estatístico para todos os conjuntos de dados. Analisando os resultados dos valores mínimos e máximos (Tabelas 2 e 3), é possível indicar que há variabilidade de atributos entre os pontos amostrais e entre as quatro coletas. Por exemplo, na Tabela 3 o parâmetro pH varia de acordo com o ponto de coleta (de 7,37 a 8,89 na coleta 3).

Isso é mais evidente para os demais parâmetros, como o oxigênio dissolvido (variação de 3,94 a 9,8 mg L⁻¹), fósforo total (entre 0,01-0,08 mg L⁻¹), carbono orgânico dissolvido (de 3,87 a 17,9 mg L⁻¹), entre outros. Esta variabilidade está relacionada com pontos mais lânticos (dentro da lagoa), a influência do Rio Barigui (Figura 2) na lagoa e do sedimento, principalmente onde os ventos o ressuspendem, sendo mais intenso dentro da lagoa, alterando assim as características abióticas.

Além disso, constata-se que a maioria dos parâmetros sofrem alterações de acordo com a sazonalidade. Esta constatação está perceptível no carbono orgânico, que varia de 9,45 mg L⁻¹ no outono a 16,03 mg L⁻¹ no inverno. Ao comparar os valores de mínimos e máximos obtidos desse parâmetro na primeira coleta (outono), estes valores não se repetem para as demais estações.

Tabela 2: Resumo estatístico para as coletas 1 e 2, referente as estações de outono e primavera.

Coleta 1							Coleta 2						
Mínimo	7,2	4,6	0,07	0	0,18	6,94	5,57	2,43	0,1	0,02	0	8,74	
Mediana	7,5	6,8	0,37	0	0,28	8,83	7,42	5,76	0,17	0,02	0,01	14,98	
Média	7,61	6,53	0,32	0,02	0,3	9,45	7,37	6,04	0,16	0,05	0,28	15,86	
Máximo	8,6	7,8	0,56	0,1	0,47	13,43	7,82	7,67	0,21	0,2	0,84	24,64	
Desvio padrão	0,37	1,13	0,02	0,02	0,08	1,9	0,5	1,24	0,03	0,04	0,35	5,13	
Assimetria	1,13	-0,44	-0,3	1,83	0,4	0,62	-2,13	-0,85	-0,53	2,41	0,53	0,13	
Curtose	0,51	-1,36	-1,37	3,06	-1,04	-0,8	5,38	1,14	-0,76	5,71	-1,62	-1,3	
Variância	0,14	1,28	0,02	0	0,01	3,6	0,25	1,55	0	0	0,12	26,39	

Porém, para todos os conjuntos de dados, os valores da média e mediana são próximos. Isso indica uma distribuição próxima a normal e desejável para aplicabilidade da metodologia geoestatística. Além disso, os valores das medidas de curtose e assimetria tendem a ficar próximos de 0 e 3, confirmando tal observação (MONEGO et al., 2010; WACKERNAGEL, 2003).

Tabela 3: Resumo estatístico para as coletas 3 e 4, referente as estações de verão e inverno.

Coleta 3							Coleta 4						
Mínimo	7,37	3,94	0,01	0	0	3,87	7,28	2,96	0,01	0,01	0	5,61	
Mediana	8,52	7,46	0,03	0,03	0	11,47	9,09	5,91	0,12	0,05	0,02	12,75	
Média	8,24	6,67	0,03	0,02	0,42	11,89	8,83	6,81	0,14	0,09	0,15	16,03	
Máximo	8,89	9,8	0,08	0,04	1,71	17,9	10,26	16,63	0,28	0,26	0,62	58,11	
Desvio padrão	0,61	2,08	0,02	0,01	0,62	3,92	0,89	3,39	0,09	0,08	0,2	10,9	
Assimetria	-0,45	-0,01	1,08	-0,82	0,79	-0,49	-0,41	1,07	-0,07	0,64	0,83	2,62	
Curtose	-1,67	-1,78	0,21	-0,22	-1,23	-0,8	-1,18	0,83	-1,54	-0,94	-0,83	7,71	
Variância	0,37	4,34	0	0	0,39	15,33	0,8	11,47	0,01	0,01	0,04	118,8	

Análise e Modelagem do Semivariograma Experimental

Como apresentado na sessão 2.2.2, para modelar a dependência espacial utilizou-se as funções da família Matérn, devido flexibilidade do modelo, uma vez que possui um parâmetro de suavização (*k*) incorporado na função. Desta forma, utilizou-se os valores de *k* igual a 0,5, 1,5 e 2,5, para dois tipos de ajustes: mínimos quadrados ponderados (MQP) e máxima verossimilhança (MV). Os semivariogramas elaborados estão apresentados nas Figuras 3 e 4.

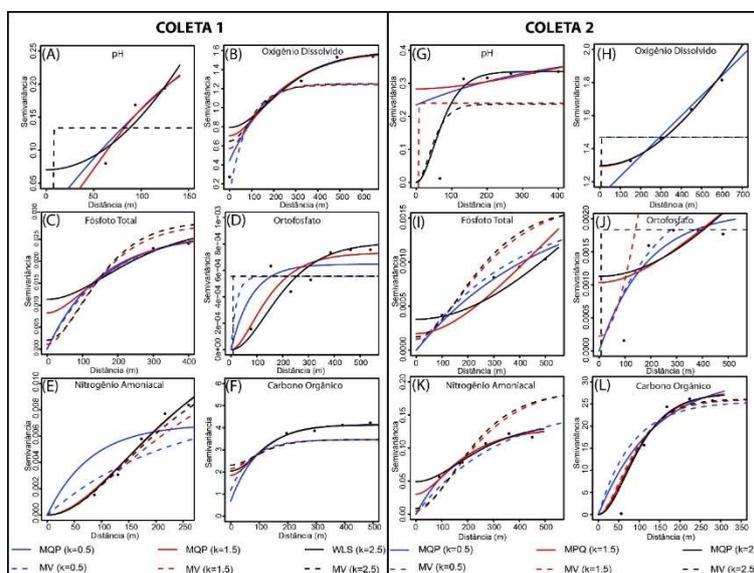


Figura 3: Semivariogramas das coletas 1 e 2, referente as estações de outono e primavera, utilizando o modelo Matérn com *k* igual a 0,5, 1,5 e 2,5 para dois métodos de ajuste: MQP e MV.

A diferença entre os dois métodos de ajuste (MV e MQP) é muito perceptível nos semivariogramas. As curvas ajustadas pelo MQP tendem a encontrar sobre os pontos do variograma. Já as curvas pelo método MV, encontram-se mais distanciadas. Esse comportamento é evidente na Figura 4 para o oxigênio dissolvido (B), fósforo total (C), ortofosfato (D) e nitrogênio amoniacal (E).

Além disso, constatou-se que todos os semivariogramas apresentam ao menos um modelo, seja ajustado pelo método MQP ou MV, que possui um comportamento de crescimento horizontal a partir da origem. A Figura 3 (B) ilustra este crescimento para o oxigênio dissolvido, no modelo utilizando MV com $k=0,5$. Foi possível verificar a presença da correlação espacial entre os conjuntos de dados e que a pequenas distâncias, maior a dependência espacial.

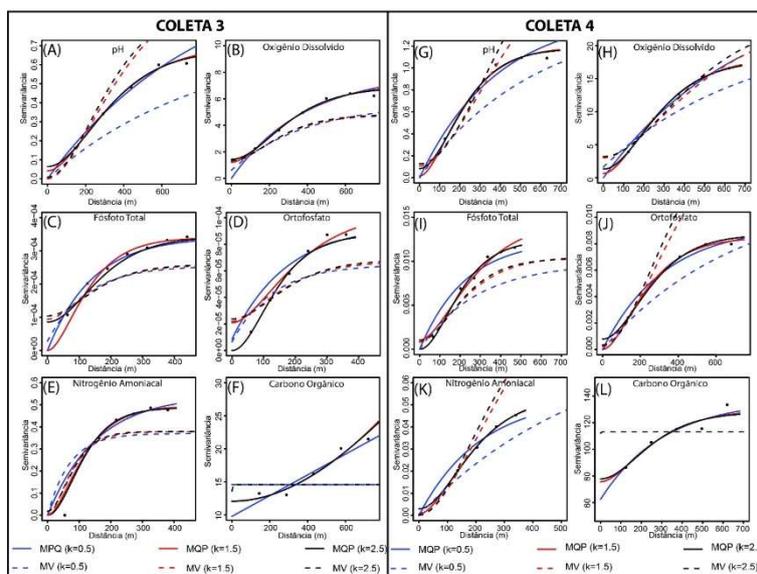


Figura 4: Semivariogramas das coletas 3 e 4, referente as estações de verão e inverno, utilizando o modelo Matérn com k igual a 0,5, 1,5 e 2,5 para dois métodos de ajuste: MQP e MV.

Entretanto, alguns modelos apresentaram o conceito de “efeito pepita puro”. Isso ocorre quando a variabilidade do conjunto é totalmente aleatória, sem alcance definido. Esse fenômeno indica uma ausência de dependência espacial e, neste caso, não podendo utilizar o método de Krigagem (LANDIM et al., 2013). Na Figura 3 (A e D), os modelos MV (0,5, 1,5 e 2,5) para o pH e ortofosfato apresentaram esse comportamento.

Outra característica observada nos semivariogramas está relacionada a variabilidade da concentração do parâmetro a grandes e pequenas distâncias. Na coleta 1, o pH (Figura 3(A)) e o nitrogênio amoniacal (Figura 3(E)) apresentam uma variabilidade maior a distâncias inferiores, comparado a outros parâmetros. Ainda, é importante destacar que esse comportamento sofre alteração entre as coletas. Por exemplo, o carbono orgânico na coleta 1 (Figura 3 (F)) indica uma variabilidade maior e médias distâncias, enquanto na coleta 2 (Figura 3 (L)) esse fenômeno acontece para pequenas distâncias.

Modelos selecionados

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resumos dos modelos selecionados para cada coleta e parâmetro. Evidencia-se que o modelo Matérn $k = 0,5$ foi o que mais adequou aos dados. Na primeira parte de cada

tabela (esquerda), encontram-se os parâmetros ajustados pelo método de mínimos quadrados ponderados (MQP). Já na parte direita da tabela, estão representados os modelos que foram ajustados pelo método máxima verossimilhança (MV).

Tabela 4: Modelos selecionados para os parâmetros das coletas 1 e 2: outono e primavera.

Parâmetro	Coleta 1						Coleta 2					
	MQP			MV			MQP			MV		
	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5
pH												
OD												
Fósforo Total												
PO ₄ ³⁻												
N-NH ₃												
COD												

Como apontado por Uribe-Opazo et al. (2012), Matérn com valor de $k = 0,5$ reduz-se ao modelo exponencial. Com isso, é possível observar que o resultado dos modelos selecionados reforça a constatação de Isaaks et al. (1989), no qual o modelo exponencial é muito utilizado para a modelagem de fenômenos ambientais.

Tabela 5: Modelos selecionados para os parâmetros das coletas 3 e 4: verão e inverno.

Parâmetro	Coleta 3						Coleta 4					
	MQP			MV			MQP			MV		
	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5	k = 0,5	k = 1,5	k = 2,5
pH												
OD												
Fósforo Total												
PO ₄ ³⁻												
N-NH ₃												
COD												

A coleta de inverno (Tabela 5, coleta 4) evidenciou ainda mais a predominância do modelo $k = 0,5$ para estimar os dados não amostrados. Para essa coleta, apenas o ortofosfato não se adequou melhor a este modelo. Além disso, de forma geral, foi possível notar que o ajuste pelo MQP ocorreu para a maioria das amostras, pois ajustou-se bem aos modelos e forneceu melhores estimativas.

Krigagem: Mapeamento da distribuição dos parâmetros

Após selecionado o modelo, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária. As Figuras 5 e 6

mostram os mapas interpolados individualmente de acordo com o seu modelo para todas as coletas. Este resultado apresenta um retrato de como estavam os parâmetros de qualidade da água na lagoa. De forma geral, foi possível observar que para o Rio Barigui (tracejado cinza na porção sul, sudeste e leste das Figuras 5 e 6), em termos de nutrientes (nitrogênio amoniacal e ortofosfato) e carbono orgânico dissolvido, os maiores valores foram encontrados na coleta 4, a qual foi o período de maior estiagem (Tabela 1). Esses nutrientes são característicos de contaminação antrópica, principalmente relacionados a presença de efluentes domésticos.

Kramer et al. (2015) estudaram os níveis de perturbação antrópica no rio Barigui e concluíram que o rio recebe aporte de efluentes domésticos, chegando a concentrações de $4,42 \text{ mg L}^{-1}$ de nitrogênio amoniacal. Assim, percebe-se que parte do aporte dos contaminantes na lagoa é realizada pelo rio, sendo que as maiores concentrações são em períodos de estiagem por não ocorrer diluição desses contaminantes na lagoa.

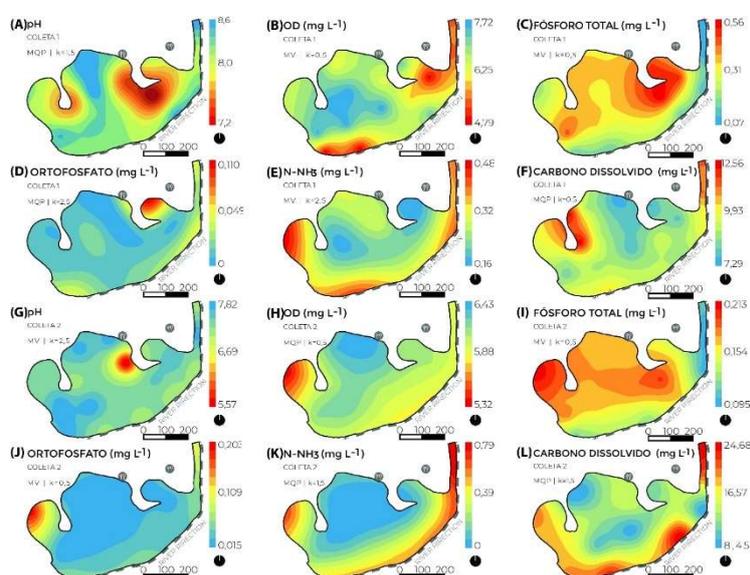


Figura 5: Mapa da distribuição dos parâmetros de qualidade da água para as coletas 1 e 2: outono e primavera.

Cabe destacar que na coleta 4 foi observado grande quantidade de fitoplâncton na lagoa, que unido as maiores concentrações de nutrientes detectados, pode indicar início de eutrofização. O fósforo total pode ser tanto proveniente de contaminação antrópica, principalmente no uso de fertilizantes ou efluentes domésticos, como de fontes pedogênicas (origem do solo). Nas figuras 5 e 6, pode-se observar que fósforo total têm comportamentos diferente frente a eventos de precipitação. Nas coletas que ocorram fortes precipitações nos dias que as antecederam, coleta 1 e 2, observa-se que as maiores concentrações de fósforo total se concentram na porção norte da lagoa, o que pode indicar fósforo de origem pedogênica, advindo da porção vegetal do parque Barigui.

Nas demais coletas, que ocorreram em período de estiagem (coleta 4) ou sob baixa precipitação (coleta 3), as maiores concentrações estão localizadas no percurso do rio, apontando possível aporte deste nutriente, indicando desta forma, contaminação antrópica pontual (situação corroborada pelas concentrações de ortofosfato, característico de contaminação por efluentes domésticos).

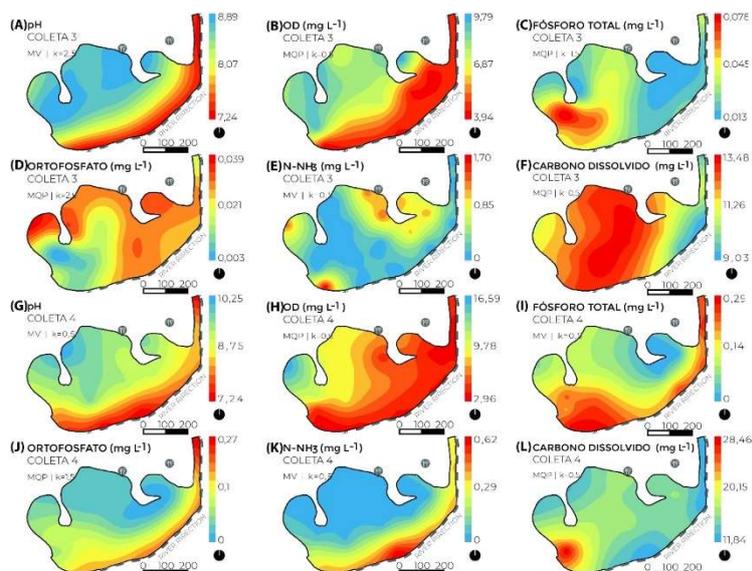


Figura 6: Mapa da distribuição dos parâmetros de qualidade da água para as coletas 3 e 4: verão e inverno.

Além das fontes citadas anteriormente, outros fatores podem estar contribuindo com a presença de nutriente na lagoa, como: 1) o restaurante e a lanchonete (pontos indicados nas Figuras 5 e 6); 2) A existência de grande quantidade de capivaras e outros animais na porção nordeste que defecam nas proximidades; e 3) a ressuspensão do sedimento, com liberação de nutrientes para a coluna de água, observado pela variação dos mesmos na região rasa da lagoa (porção noroeste).

Nos mapas, para o parâmetro pH, é possível notar que na maior parte das coletas apontam como águas que tendem a ser alcalinas. Somente na coleta 2, como bem destacado na porção nordeste da lagoa, a água apresentou pH com uma leve acidez. Esse resultado pode estar relacionado com elevada precipitação acumulada no período da coleta 2 (SIMEPAR, 2017), no qual efluentes domésticos e outras fontes de poluição lixiviaram para esta porção da lagoa.

Em relação as normas relativas à qualidade da água, a resolução do CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece limites de alguns parâmetros de qualidade de água para classes de ambientes aquáticos (varia de classe especial a classe 4). Seguindo esta classificação, de acordo com Paraná (1992), o rio Barigui, contribuinte da margem direita do rio Iguaçu, à jusante do Parque Barigui, suas águas estão enquadradas na classe 3. Na resolução, com relação ao oxigênio dissolvido, as concentrações devem ser superiores a 4 mg L^{-1} para corpos de água classe 3. Assim, observa-se que alguns pontos que sofrem interferência do rio Barigui encontram-se fora dos limites estabelecidos pela legislação.

Com base nesses parâmetros analisados, foi possível evidenciar que a região estudada se encontra com uma degradação razoável em relação a qualidade das suas águas. Além disso, é notório que essa qualidade é fortemente influenciada por fontes poluidoras diretas, oriundas principalmente de atividades antrópicas em sua bacia (KRAMER et al., 2014).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos foram satisfatórios e a metodologia geoestatística mostrou-se eficiente neste

estudo. Foi possível identificar e quantificar a dependência espacial das variáveis utilizadas. Os mapas gerados por krigagem representam, com confiabilidade estatística, a distribuição das concentrações de pH, oxigênio dissolvido, fósforo total, ortofosfato, nitrogênio amoniacal e carbono dissolvido na lagoa do parque Barigui, de acordo com as quatro estações do ano.

Além disso, o monitoramento dos parâmetros de qualidade da água na lagoa do rio Barigui demonstrou que ocorre uma elevada concentração de poluentes conforme a proximidade com o seu rio, local que provavelmente recebe um maior aporte de efluentes domésticos. Com base nisso, constatou-se que a poluição da área de estudo pode ser reduzida significativamente com a melhora no tratamento do esgoto e sistema de coleta na bacia do Barigui.

Por fim, os resultados levam a crer que o uso da metodologia geoestatística, além de didática, traz contribuições significativas e pode ser utilizada para diversos estudos que envolvam a área de controle e monitoramento dos recursos hídricos, como na dispersão de sedimentos, identificação e concentração de fármacos, na batimetria, entre outros. Também, neste estudo de caso, a utilização dos mapas de distribuição auxiliou na distinção de fontes de poluição da lagoa e, assim, contribuiu para uma melhor percepção do estado de degradação do ambiente em questão. Cabe destacar que ferramentas de geoprocessamento são extremamente úteis e necessárias na gestão de recursos hídricos e sua utilização combinada a novas abordagens podem contribuir ainda mais na tomada de decisão de gestores.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao Laboratório de Estudos Avançados em Química Ambiental (LEAQUA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Instituto das Águas do Paraná.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.. **Educação ambiental para a sustentabilidade dos recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.

ALMEIDA, S. L. H.; CAPELINI, V. A.; ROSAS J. T. F.; OLIVEIRA, G. D.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.. Geoestatística multivariada para a estimativa da temperatura média anual no Estado da Bahia, Brasil. **Revista Univap**, São José dos Campos, v.22, n.40, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.1636>

AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; CEDDIA, M. B.; ZONTA, E.; MAGALHÃES, M. O. L.; FREITAS, F. C.; LIMA, E. S. A.. Spatial variability and solubility of barium in a petroleum well-drilling waste disposal area. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.190, n.228, p.1-11, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10661-018-6566-x>

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: APHA, 2012.

AUER, A. M.. **Avaliação dos processos de ocupação antrópica da bacia do rio Barigui e suas implicações ecológicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA n.357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: DOU, 2005.

BRASIL. **Lei n.9433 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília: DOU, 1997.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A.. **Estatística Básica**. 9 ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

CASTRO JUNIOR, R. M.; SOBREIRA, F. G.; BORTOLOTTI, F. D.. Modelagem geoestatística a partir de parâmetros da qualidade da água (IQA-NSF) para a sub-bacia hidrográfica do Rio Castelo (ES) usando sistema de informações geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.59, n.3, p.214-253, 2007.

DOZSA, B.; MONEGO, M. L. C.; KUMMER, L.. Modelagem geoestatística da ocorrência de casos de leptospirose e alagamentos no município de Curitiba – Paraná, no ano de 2014. **Revista Holos**, v.1, p.381-393, 2016. DOI: <http://doi.org/10.15628/holos.2016.3857>

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M.. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004.

RIBEIRO FILHO, J. C.; SANTOS, J. C. N.; ARUAJO NETO, J. R.; LEMOS FILHO, L. C. A.; BRASIL, J. B.. Estimativa das erosividades anuais e mapeamento para o Estado do Ceará. **Revista Geonorte**, v.8, n.30, p.1-15, 2017. DOI: <http://doi.org/10.21170/geonorte.2017.V.8.N.30.1.15>

FROEHNER, S.; MARTINS, R. F.. Avaliação da composição química de sedimentos do Rio Barigui na região metropolitana de Curitiba. **Química Nova**, São Paulo, v.31, n.8, p.2020-2026, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800020>

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M.. **Applied Geostatistics**. London: Oxford University Press, 1989.

KRAMER, R. D.; MIZUKAWA, A.; IDE, A. H.; MARCANTE, L. O.; SANTO, M. M.; AZEVEDO, J. C. R.. Determinação de anti-inflamatórios na água e sedimento e suas relações com a qualidade da água na bacia do Alto Iguaçu, Curitiba - PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n.3, p.657-667, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n3.p657-667>

LISBOA, E. G.; CARVALHO, J. M. C. M.; MENDES, R. L. R.. O Uso da Geoestatística na Avaliação dos Parâmetros Hidrogeológicos para Compôr o Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.1, p.188-199, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p188-199>

LUNDGREN, W. J. C.; ALEIXO DA SILVA, J. A.; FERREIRA, R. L. C.. A Precisão da Estimativa do Erro da Krigagem pela Validação Cruzada. **Revista Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.24, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.124114>

MACHADO, P. B.; SOUSA, A. J.. A geoestatística como

ferramenta de estudo da batimetria na vertente continental portuguesa. **Revista Finisterra**, Lisboa, v.38, n.76, p.95-107, 2003. DOI: <https://doi.org/10.18055/Finis1574>

MONEGO, M. L. C. D.; RAMOS, P.; NEVES, M. V.. Avaliação de impacto ambiental de descargas de águas residuais usando uma metodologia geoestatística. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.15, n.3, p.57-68, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v15n3.p57-68>

PARANÁ. Superintendente da Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente. **Portaria n. 20 de 12 de maio de 1992**. Enquadra os cursos d'água da Bacia do Alto Iguaçu, de domínio do Estado do Paraná. SUREHMA, 1992.

PEDROSA, A. C.; GAMA, S. M. A.. **Introdução computacional à probabilidade e estatística**. Porto, 2016.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008.

SANTOS, A. S.; MEDEIROS, N. G.; SANTOS, G. R.; LISBOA FILHO, J.. Uso da Geoestatística na Avaliação da Acurácia Posicional Absoluta de dados Geoespaciais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.23, n.3, p.405-418, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1590/s1982-21702017000300027>

SIMEPAR. Sistema Meteorológico do Paraná. **Dados da estação meteorológica localizada no Centro Politécnico em Curitiba/PR, para os anos de 2016 e 2017**. Curitiba: SIMEPAR, 2017.

URIBE-OPAZO, M. A.; BORSSOI, J. A.; GALEA, M.. Influence diagnostics in Gaussian spatial linear models. **Journal of Applied Statistics**, v.39, n.3, p.615-630, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1080/02664763.2011.607802>

WACKERNAGEL, H.. **Multivariate geostatistics: An introduction with applications**. Berlin: Springer, 2003.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.