

USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO PARA ANALISAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA QUALIDADE DE ÁGUA POTÁVEL NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Odair Katsutomo Augusto⁽¹⁾

Químico pela Universidade Ibirapuera e Engenheiro Agrônomo pela Faculdade Cantareira. Especialização em Engenharia do Saneamento Básico pela Faculdade de Saúde Pública da USP. Aperfeiçoamento em tópicos de Estatística pelo Instituto de Matemática e Estatística da USP. Pós-graduado em Geoprocessamento pelo SENAC – SP. Trabalha na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, onde atuou como analista, químico, supervisor de laboratório e atualmente exerce atividades relacionadas à gestão da qualidade.

Endereço⁽¹⁾: Rua Conselheiro Saraiva, nº 519 – Santana – São Paulo – SP – CEP: 02037-021 – Brasil – Tel: +55 (11) 2971- 4209 – email: odairkaugusto@sabesp.com.br

RESUMO

O OBJETIVO DESTES ESTUDO FOI UTILIZAR A GEOESTATÍSTICA PARA ANALISAR A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS TEORES DE TURBIDEZ E CLORO RESIDUAL LIVRE NA ÁGUA POTÁVEL DISTRIBUÍDA A POPULAÇÃO, PARA AUXILIAR NA GESTÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DE ÁGUA. FORAM EFETUADOS PESQUISAS BIBLIOGRÁFICAS DE GEOPROCESSAMENTO, SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS, ANÁLISE ESPACIAL, GEOESTATÍSTICA E CONTROLE DE QUALIDADE DE ÁGUA POTÁVEL. SEGUIRAM-SE NA ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO, AS ETAPAS DE PLANEJAMENTO DA AMOSTRAGEM, COLETA E ENSAIO DAS AMOSTRAS, ARMAZENAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE GEOESTATÍSTICA. AVALIARAM-SE OS MODELOS VARIOGRÁFICOS ESFÉRICO, EXPONENCIAL E GAUSSIANO PARA INTERPOLAÇÃO DOS ATRIBUTOS. OS DADOS INDICARAM QUE O MODELO EXPONENCIAL ATENDEU MELHOR AOS CRITÉRIOS AVALIADOS E UTILIZOU-SE ESTE MODELO PARA EFETUAR A INTERPOLAÇÃO E REPRESENTAÇÃO EM MAPAS TEMÁTICOS. VERIFICOU-SE NO MAPA TEMÁTICO DE TEOR DE TURBIDEZ, VALORES PONTUAIS ANÔMALOS. NA AVALIAÇÃO DO TEOR DE CLORO RESIDUAL LIVRE, OBSERVOU-SE UMA TENDÊNCIA DE DIMINUIÇÃO GRADATIVA DO TEOR DE CLORO RESIDUAL LIVRE. OBSERVOU-SE TAMBÉM MAIOR VARIABILIDADE DA ESTIMATIVA, ONDE A DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS DE AMOSTRAGEM FORAM MAIORES. OS RESULTADOS MOSTRARAM QUE A GEOESTATÍSTICA PODE AUXILIAR NA GESTÃO DO CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA POTÁVEL NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO. AINDA OUTROS ESTUDOS FORAM SUGERIDOS, UTILIZANDO A TÉCNICA DO GEOPROCESSAMENTO.

PALAVRAS-CHAVE: Geoprocessamento, Análise espacial, Qualidade da água

INTRODUÇÃO

De acordo com Câmara, Davi e Monteiro, (2001) historicamente até a metade do século XX as informações geográficas eram somente armazenadas em documentos e mapas. Na segunda metade do século passado, com a evolução da tecnologia da informática, essas informações começaram a serem armazenadas em ambientes computacionais, dando início ao aparecimento do geoprocessamento, sendo esta tecnologia, potencial para o tratamento de informações geográficas por apresentar custo relativamente baixo de software e hardware. No Brasil, essa tecnologia começa a se desenvolver no início da década de 80, cuja ferramenta permite convergência de diferentes disciplinas do conhecimento, transformando em representações computacionais adequadas, oferecendo estrutura de dados e algoritmos que representam a diversidade de concepção do espaço. O sistema de distribuição de água potável é composto de reservatórios, sistemas de bombeamento,

tubulação e cavaletes para conduzir a água até o cliente com quantidade e qualidade dentro dos padrões. No trajeto da água entre a unidade de tratamento e a torneira do consumidor, a mesma pode sofrer degradações devido a possíveis reações químicas e biológicas, sendo os principais relacionados ao contato da água com o material do sistema de distribuição e a contaminação por fontes externas devido ao rompimento das tubulações e manutenção inadequada dos reservatórios de distribuição. (MORENO et al., 2012).

O presente trabalho é sobre uso da tecnologia do geoprocessamento para tratamento e análise dos atributos da qualidade de água potável na rede de distribuição, de forma espacial, utilizando a geoestatística, e posterior representação das concentrações e a variabilidade desses atributos em mapas temáticos.

OBJETIVO

Utilizar a geoestatística para analisar a distribuição espacial dos teores de turbidez e cloro residual livre na água potável distribuída para consumo humano, para auxiliar a gestão do controle de qualidade de água.

Justificativa

A tecnologia do geoprocessamento enfatizava a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática, entretanto, os fenômenos espaciais são dinâmicos e um dos grandes desafios da ciência da informação espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que representem adequadamente os fenômenos espaço-temporais dinâmicos, segundo Meirelles, Camara e Almeida (2007).

A legislação não menciona a utilização do geoprocessamento para auxílio à gestão da qualidade do sistema de distribuição de água, no entanto, a água na rede de distribuição é um sistema dinâmico, podendo também haver variabilidade pontuais de seus atributos ao longo do sistema de distribuição. Desta forma, na avaliação da qualidade da água é importante efetuar a análise estatística espacial da área abrangida pelo sistema. Com o uso do geoestatística é possível avaliar se os dados são interdependentes, posteriormente escolher o melhor modelo para estimativa dos valores dos atributos da área não amostrada.

CONCEITOS

Geoprocessamento

O geoprocessamento utiliza técnicas computacionais e matemáticas para tratamento de informações geográficas através dos instrumentos de Sistema de Informações Geográficas (SIG) integrando dados de várias fontes e georreferenciados. As principais formas de utilização do SIG são como: ferramentas de produção de mapas, suporte para análise espacial de fenômenos e banco de dados geográficos, sendo o principal objetivo fornecer ferramentas computacionais para determinar a evolução espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações nestes diferentes fenômenos. (ASSAD; SANO, 1998). Segundo Silva e Zidan (2013), a origem da tecnologia do geoprocessamento em associação com o sensoriamento remoto foi para atividades bélicas, para obtenção e análise da distribuição de dados ambientais, com interesse militar. Atualmente com o avanço da tecnologia, tornou-se possível analisar sistematicamente as propriedades e as relações de dados georreferenciados.

Devido ao gradativo crescimento das cidades, de acordo com Ribeiro (2012), o setor de saneamento tem como uma das consequências, a necessidade de expansão da infraestrutura, em especial ao fator geográfico, sendo necessário ferramentas de gestão para interpretar o grande volume de dados gerados diariamente em todo o processo de produção de água potável. As tecnologias de geoprocessamento são uma maneira que representam adequadamente o conjunto de informações para tomadas de decisões relacionados a distribuição de água potável, sendo considerado como um conjunto de ações para possibilitar a inclusão da inteligência geográfica no processo da empresa. A inclusão de SIG, contribui na solução e gestão dos problemas que exigem análise espacial. Os dados espaciais da área de saneamento podem ser sistematizados em ambiente computacional e com auxílio do SIG, efetuar cruzamento dessas informações e projetar cenários, auxiliando na tomada de decisões de trabalhos rotineiros na companhia.

Sistemas de Informação Geográfica

De acordo com Assad e Sano (1998), os SIG são instrumentos computacionais do geoprocessamento que permitem realizar análises complexas integrando dados de diversas fontes e com banco de dados georreferenciados é possível determinar as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre os diferentes fenômenos. As principais características do SIG são integrar numa única base de dados as informações espaciais de dados cartográficos e oferecer mecanismos para combinar as várias informações utilizando algoritmos de manipulação e análise, assim como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados. Os componentes da estrutura geral que se relacionam num SIG são:

- A interface homem-máquina que define como o sistema é operado e controlado;
- O mecanismo de processamento de dados espaciais para consulta, análise espacial e processamento de imagens;
- Um sistema de gerência de banco dados geográficos que controla o armazenamento e a recuperação de dados espaciais e seus atributos.

Segundo Ribeiro (2012), o usuário pode utilizar dados proveniente de sistemas de informação por meio de elementos gráficos, mapas, tabelas e imagens. Com auxílio da tecnologia da visualização de dados do sistema de informação geográficas, facilitam a visualização de dados e ajuda o usuário a perceber a inter-relação entre os mesmos. Com uso do software pode agrupar, armazenar, manipular e exibir informações geograficamente, reunindo dados com pontos, linhas e áreas de um mapa.

O maior vendedor de software da ferramenta SIG atualmente é a marca ArcGIS, que possui uma família de produtos para atender as necessidades distintas de usuários. Os SIG pioneiros tiveram êxito em captar como o mundo parece, mas não tiveram tanto sucesso em demonstrar como funciona. Ao longo do tempo os fornecedores de software de SIG desenvolveram rotinas gerais que podem ser personalizadas para aplicação específicas e para visualização de dados espaciais. Atualmente esta ciência está desenvolvida e com ampla experiência, abrangendo conceitos com base mais completa para resolução dos problemas, portanto, as aplicações desta ferramenta devem estar fundamentadas em conceitos e teorias claras. As aplicações básica do SIG são os mapeamentos, medição, monitoramento, modelagem e gerenciamento. São diversas as áreas de aplicação, dentre eles no governo e serviços públicos. Em qualquer área de aplicação é necessário manter uma mente curiosa constante, questionando o acontecimento e os significados dos fenômenos, utilizando termos bem definidos e compreendidos para que o conhecimento seja bem comunicado, bem como a acurácia das observações, medições e predições. A acurácia da representação dos dados de um atributo é um dos critérios mais importantes, assim, deve ter a devida atenção. (LONGLEY et al., 2013)

Análise espacial

Ainda, segundo Longley et al., (2013) as decisões com apoio do SIG requerem informações de fácil interpretação e através da geovisualização torna possível comunicar aos usuários o significado de uma representação espacial do mundo real, cuja técnica é usada para explorar, analisar, sintetizar e apresentar dados espaciais. Através da análise espacial transformam-se os dados brutos em informação útil de descoberta científica ou para tomada de decisão mais acertada, tornando explícito o que está implícito e agregando valor aos dados geográficos. A análise espacial é baseada na localização, podendo comparar diferentes propriedades de um mesmo local, procurando uma explicação se houver inter-relações dessas propriedades.

Segundo Meirelles, Camara e Almeida (2007), a localização espacial é a principal característica da informação geográfica, pois os dados não coexistem de forma isolada e independente, pois, os fenômenos se inter-relacionam, possuindo uma dinâmica conjunta, surgindo a necessidade de integrar estas informações. Uma criação de base de dados geográfica em ambiente SIG, com armazenamento das variações do fenômeno é utilizado para organizar o conhecimento de forma que as informações mais complexas possam ser agrupadas e derivada dessa base de dados.

Segundo Longley et al., (2013), a variação espacial no serviço público de água é um processo controlado, caracterizando assim, um ambiente operacional do SIG na gestão deste serviço, existindo uma gama crescente de valores nos dados espaciais, conseqüentemente, maior heterogeneidade com o aumento das distâncias. Para

avaliar esta variação espacial é necessário efetuar a amostragem espacial e utilizar procedimentos de inferência estatística para poder inferir a partir dos dados das amostras sobre a população da qual se originam. De acordo com Drunck et al.,(2004), quando há dependência espacial nos dados, existe perda do poder explicativo na inferência estatística espacial, se considerarmos amostras independentes do mesmo tamanho.

Estatística espacial/Geoestatística

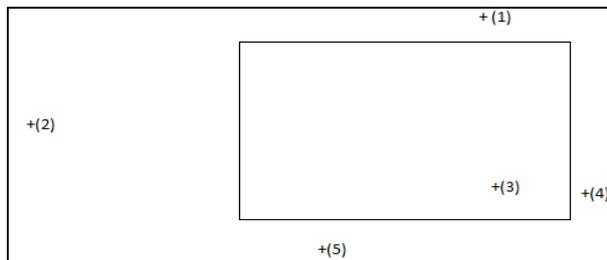
De acordo com Yamamoto e Landim (2013), o conjunto de observações que constituem uma amostra é o ponto de partida para o estudo estatístico espacial, cujos dados de natureza quantitativa ou qualitativa da variável de interesse, são utilizados para inferir as propriedades do fenômeno espacial em estudo, avaliando a distribuição e variabilidade espacial. A amostragem para avaliação do fenômeno espacial sendo representativa, deve reproduzir a distribuição e variabilidade espacial tanto em número de pontos amostrados como em termos de distribuição dos mesmos no espaço estudado. O processo de estudos de características espaciais deve ser feito com base em planejamento da área avaliada, definindo os esquemas de amostragem. O desenho amostral é utilizado para representar a complexidade do mundo real, sendo necessário amostrar eventos e ocorrências de elementos de interesse. Os esquemas de amostragem podem ser de forma aleatória simples, aleatória estratificada ou sistemática. Na amostragem aleatória simples, as amostras são coletadas na área de estudo e a aleatoriedade são as coordenadas geográficas escolhidas aleatoriamente, sendo esta metodologia que apresenta o pior resultado pois apresentam pontos agrupados ou áreas não amostrados. Na amostragem aleatória estratificada, a região em estudo é subdividido em células de mesmas dimensões nas direções norte-sul e leste-oeste, sendo escolhido aleatoriamente um ponto de amostragem dentro de cada célula, assim o número de amostras será equivalente ao número de células, sendo este método melhor que a anterior. Na amostragem sistemática, é definido uma malha na área em estudo e a amostragem é realizada sobre o nós das mesmas, sendo este o método que oferece melhor resultado, todavia, na prática há muitas dificuldades, porque o nó pode se localizar onde não é possível o acesso. Independentemente da forma de amostragem, a geoestatística tem como objetivo extrair o máximo de informações obtido das amostras coletadas. Para Meirelles et al., (2007, p. 202), um dos objetivos da geoestatística é “prover planos de amostragem que minimizem o custo e maximizem a precisão das estimativas, levando em conta a continuidade espacial da variável estimada”.

Segundo Longley et al., (2013), na amostragem científica, para que cada elemento do esquema amostral possa ser selecionado, às vezes é preciso selecionar algumas observações em detrimento de outros para ter uma abstração genérica. Na amostragem sistemática, dependendo do estudo pode ser problemática se o intervalo amostral e a estrutura espacial da área de estudos forem coincidentes e o esquema amostral for para exibir periodicidade. Esquemas híbrido pode ser utilizado, como mudanças periódicas aleatórias na largura da malha amostral. Também pode ser utilizado amostragem agrupados em uma célula do espaço amostral, escolhido aleatoriamente, por exemplo para áreas extensas, quando o custo de transporte é proibitivo, porém, nestes casos deve ter o conhecimento de que este agrupamento de amostras deve ser representativo para o fenômeno em estudo. Alguns fenômenos não são totalmente explicados pela lei de Tobler, que diz que os valores dos vizinhos próximos ao local amostrado é mais parecido que os valores que estão mais distantes, nestes casos os desenhos amostrais devem ser específicos, por exemplo, uma amostragem em uma área com declividade, as amostras podem ser coletados ao longo da isolinha, podendo melhorar a qualidade da representação com custo mínimo de coleta de dados.

Para reproduzir as características do fenômeno espacial, de acordo com Yamamoto e Landim (2013), utiliza-se o processo denominado interpolação ou estimativa, baseado nos dados dos pontos amostrados, fazendo inferência da distribuição e variabilidade espacial de locais não amostrados por meio de ajuste de funções matemáticas locais. A estimativa dos pontos não amostrados é necessário porque não são efetuados amostragem em pontos muito próximos entre si, entretanto, a qualidade dessa inferência espacial depende do tamanho da amostra e da distribuição espacial dos pontos amostrais. A interpolação espacial é baseado na lei de Tobler. Utilizando o conjunto de técnicas dos métodos geoestatísticos é possível entender a aleatoriedade dos dados, cujos valores apresentam uma possível estruturação espacial, consequentemente uma função de correlação espacial, sendo essa função a base da estimativa da variabilidade espacial. Todos os métodos existentes utilizam a distância para fazer a inferência espacial. Na figura 1 pode ser verificado um exemplo para um valor a ser estimado com base em cinco amostras. Existindo uma correlação espacial entre os teores, os pontos mais próximos serão mais parecidos, e mais diferentes a medida que a distância entre os pontos aumenta. Assim é de se esperar que o teor da amostra 3, seja similar ao teor médio dos vizinhos próximos, apresentando assim uma correlação espacial entre os teores. Com relação a amostra 2, que está mais distante em relação aos demais, a correlação diminui. Desta forma as amostras próximas apresentam teores

relacionados, podendo ser utilizado para estimar um valor médio de uma área e a medida que a distância aumenta o relacionamento diminui até se tornarem independentes. Toda estimativa baseada em pontos amostrais está sujeita a incerteza, dessa forma a metodologia geoestatística se destaca por oferecer a incerteza associada à estimativa. A estimativa de locais não amostrados através da geoestatística, pressupõe que a Variável Regionalizada (VR) seja espacialmente correlacionada e a diferença entre o valor estimado e o observado, conhecida como resíduo é a componente da variável aleatória.

Figura 1 - Determinação de valor de uma área com base em cinco pontos conhecidos.



Fonte: Yamamoto e Landim (2013)

De acordo com Yamamoto e Landim (2013), para calcular a variância das diferenças entre dois valores separados e medir variabilidade espacial em função da distância utiliza-se o variograma $\gamma(h)$ conforme a equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

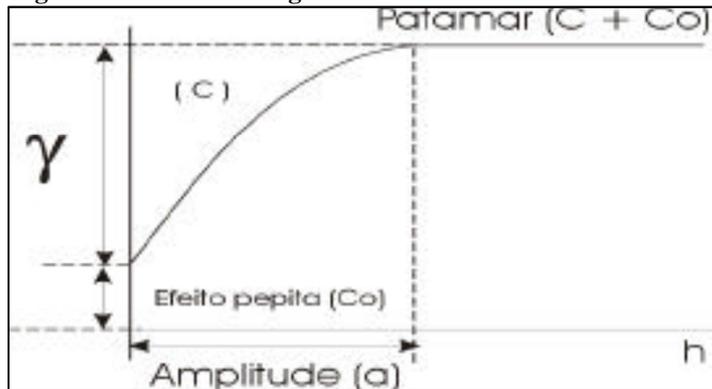
- n são os números de pares de pontos separados por uma distância h;
- Z(x) é o valor da VR no ponto x;
- Z(x + h) é o valor da VR no ponto x + h.

O tamanho da variância é função da diferença, sendo que para pontos próximos, a variância é pequena e quando aumenta a distância, a variância aumenta e se estabiliza em torno da variância máxima, denominada soleira ou patamar. De acordo com Druck et al., 2004, a estacionaridade é uma propriedade que supõe um comportamento homogêneo da estrutura de correlação espacial da região em estudo. O processo é considerado estacionário quando os efeitos de 1ª ordem (valor esperado) e de 2ª ordem (covariância entre as áreas) são constantes na região estudada e não há tendência.

Segundo Landim e Sturaro (2002), a função variograma colocada em gráfico, conforme figura 2, apresentam as seguintes propriedades:

- ✓ Patamar (C+Co) é o valor na qual o variograma se estabiliza no campo aleatório, correspondente a amplitude e C é a variância espacial;
- ✓ Efeito pepita representado por Co, quando h=0 e $\gamma(h)$ apresenta algum valor, que pode ser devido a erros de medição ou erros de amostragem, onde as amostras não foram coletados em intervalos que representem a variabilidade espacial;
- ✓ Amplitude (a) que representa a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes e toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual à amplitude, fornece informação sobre o ponto;
- ✓ Anisotropia é atribuída a fenômenos que apresentam parâmetros diferentes dos variogramas, nas diferentes direções de amostragem. Quando o gráfico do variograma é idêntico para qualquer direção é denominado isotrópico e utiliza-se variogramas omnidirecionais.

Figura 2 – Modelo variográfico



Fonte: Landim, (2002)

Os resultados dos métodos de estimação e simulação dependem de uma boa avaliação do variograma. Aplicando-se esta função ao conjunto de dados experimentais, obtém-se o variograma experimental, e estes representam as etapas mais importantes do estudo geoestatístico. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013)

De acordo com Guerra, 1988 apud Landim, 2010, uma avaliação importante no variograma é a determinação do grau de aleatoriedade (E), verificado através da equação 2:

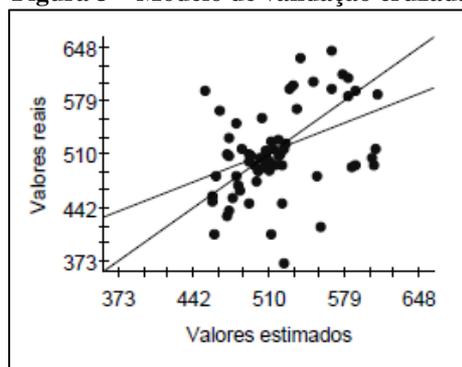
$$E = \frac{C_0}{c} \quad \text{equação (2)}$$

Se:

- $E < 0,15$: componente aleatório pequeno;
- $0,15 \leq E \leq 0,30$: componente aleatória significativa;
- $E > 0,30$: componente aleatória muito significativa.

Para situação do modelo de pepita pura a análise variográfica não se aplica, portanto sugere-se o uso de outros métodos de interpolação. Após a obtenção do variograma experimental, é preciso efetuar o ajuste de um modelo teórico de uma função matemática, que descreva continuamente a variabilidade ou correlação espacial que existe nos dados. Os modelos baseados em variogramas experimentais que apresentam a menor razão entre o efeito pepita/patamar e maior alcance são as melhores estimativas. O ajuste deste variograma a uma função é fundamental na análise variográfica, envolvendo várias tentativas e a experiência pesa muito. Pode ser efetuado por comparação visual, porém sujeito a erros, ou utilizando algoritmos para ajustes automáticos. Outra forma de verificação é a análise da validação cruzada, em que cada valor original é removido do domínio espacial e utilizando os valores não removidos, estima um novo valor para o ponto retirado, entretanto a melhor validação cruzada é aquela obtida através dos valores estimados e medidos em campo, assim pode-se construir um gráfico, conforme figura 3, mostrando a relação entre os valores reais e estimados. (LANDIM, 2010)

Figura 3 – Modelo de validação cruzada



Fonte: Landim, (2010)

Segundo Druck et al., 2004, o procedimento de ajuste do modelo não é direto e automático, mas iterativo, pois o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Os modelos básicos, denominados isotrópicos, estão divididos em modelos com patamar, referenciados como transitivos e sem patamar, para modelar fenômenos que possuem capacidade infinita de dispersão. Os modelos transitivos, representado na figura 4, mais utilizados são: esférico (equação 3), exponencial (equação 4) e gaussiano (equação 5), conforme segue:

Modelo esférico

$$\gamma(\mathbf{h}) = c \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{equação (3)}$$

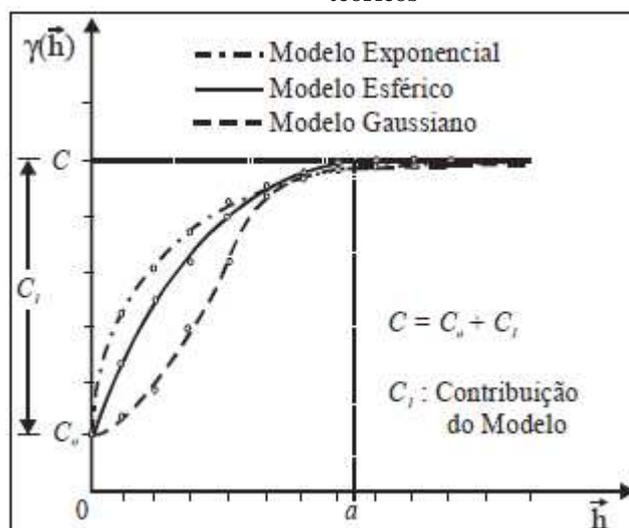
Modelo exponencial

$$\gamma(\mathbf{h}) = C \left[1 - e^{-3h/a} \right] \quad \text{equação (4)}$$

Modelo gaussiano

$$\gamma(\mathbf{h}) = C \left[1 - e^{(-3h/a)^2} \right] \quad \text{equação (5)}$$

Figura 4: Representação gráfica de semivariogramas experimentais e modelos teóricos



Fonte: DRUCK, 2004.

Segundo Matheron (1962 apud FURUIE, 2009 p.6), a krigagem é um dos mais importantes métodos locais de interpolação, cuja técnica deu origem ao campo da geoestatística. Na krigagem pressupõe-se na avaliação geoestatística, segundo Druck et al. (2004), que o processo é estacionário, cuja avaliação inclui a análise exploratória dos dados, a modelagem da estrutura de correlação espacial e a interpolação estatística da superfície. A krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, quando considerados interdependente na análise variográfica e apresenta estimativa não tendenciosa e a mínima variância associada ao valor estimado. Geralmente as estimativas geoestatísticas são melhores que os demais métodos de interpolação numérica porque utilizam a função variograma da distância entre pontos, que depende da existência ou não do efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia. Na geoestatística utiliza-se funções locais, porque é um método local de estimativa, assim pontos além do alcance do variograma não devem ser considerados, entretanto na krigagem há um mecanismo interno atenuando a influência desses pontos, podendo ser deixados como pertencente a vizinhança. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). De acordo com Landim, (2000) a krigagem é um método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas e existindo continuidade espacial, com os dados obtidos nos pontos amostrados é possível estimar o valor dos pontos onde a variável é desconhecido. As vantagens desta metodologia são que os valores estimados fornecem informações como: parâmetros adequados de número de amostras, distribuição e densidade da amostragem. Para verificar se a variável possui continuidade espacial, efetua-se a análise variográfica, permitindo o estabelecimento dos limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada. Devem ser utilizados quando há tendências regionais ou anomalias locais e quando tiver dados irregularmente amostrados

ou agrupados. As desvantagens são que o usuário pode efetuar a estimativa sem compreender o uso dos controles matemáticos, entretanto, é necessário o entendimento da geoestatística, cuja falta deste conhecimento pode não ser possível a construção de um variograma adequado, devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Não deve ser utilizado quando tiver menos de 30 pontos amostrados, pois serão número insuficiente para modelar o variograma. Segundo Furuie (2009), a krigagem ordinária (KO) é um método que minimiza a variância do erro, não apresenta enviesamento, honra os pontos dos dados amostrais, por apresentar precisão local das estimativas, exibindo melhor correlação entre os valores estimados e os valores dos pontos dados. O interpolador que estima o valor localmente, é obtida com a combinação linear dos valores vizinhos próximos, conforme a equação 6:

$$Z_{KO}^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

- $Z_{KO}^*(X_0)$ é o estimador no local X_0 ;
- λ_i são os ponderadores obtidos a partir da resolução de sistema linear da equação da krigagem;
- $Z(X_i)$ é o valor da propriedade Z nos pontos amostrais vizinhos.

De acordo com Longley et. al., (2013), existe uma diferença entre a realidade e nossa representação da realidade, isto se deve a impossibilidade da representação perfeita do mundo real, na qual existe uma incerteza associado a esta representação. Esta propriedade considera a diferença entre os conteúdos de um conjunto de dados e os fenômenos que se supõem que os dados representam, tendo as contribuições do erro, falta de acurácia, ambiguidade e idenfinação. O erro é melhor entendido quando há mudança de valor, de forma que o valor observado x' é igual ao valor verdadeiro de x mais a distorção σx , sendo este positivo ou negativo, pois estes erros são possíveis nas ambas direções. Toda medição estão associados as variabilidades de precisão e acurácia, sendo que a precisão é o grau de concordância entre os valores medidos e a acurácia é a capacidade da medição ser reproduzidas próximas ao valor verdadeiro. Uma forma de mensurar este erro é através do cálculo da raiz do erro quadrático médio (Root Mean Square Error – RMSE), conforme a equação 7, sendo este similar ao desvio padrão de observações de uma amostra, assim, muitos erros serão maiores e outros menores que RMSE, sendo esta configuração mais comum como distribuição normal.

$$RMSE = \left[\sum \frac{\sigma x^2}{n} \right]^{1/2} \quad \text{equação (7)}$$

Outra forma de medida de desvio padrão (s), quando o modelo da estimativa utilizado faz o uso da média ponderada, é definido na equação 8.

$$s = \sqrt{\sum_i w_i (x_i - \bar{x})^2 / \sum_i w_i} \quad \text{equação (8)}$$

Onde:

- x_i é a observação do número i ;
- \bar{x} é a média aritmética das observações;
- w_i é o peso atribuído a observação no número i .

Controle da qualidade da água potável

O controle de qualidade de água potável distribuída à população é baseado na portaria do Ministério da Saúde (MS) 2914 e as análises para o controle de qualidade para o consumo humano são realizados pelos laboratórios, cujos ensaios podem ser realizados em laboratórios próprios, conveniado ou subcontratado, desde que comprove a existência de um sistema de gestão de qualidade conforme os requisitos especificados na Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR ISO/IEC 17025:2005 e as metodologias utilizadas deve ter como referência o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW) mais recente. No artigo 41º da portaria MS 2914, define que os responsáveis pelo controle da qualidade da água devem elaborar o plano de amostragem, sendo um dos requisitos para a coleta

no sistema de distribuição, que esta amostragem deve ter representatividade, combinando critérios de abrangência espacial e pontos estratégicos. (BRASIL, 2011).

A rede de distribuição de água é um processo dinâmico devido as influências físicas, químicas e biológicas, portanto as amostras coletadas na rede de distribuição representam a qualidade da água no momento em que foi amostrado. Operacionalmente não é possível estocar a água até que o padrão de atendimento a potabilidade seja verificada e posteriormente liberado para a população para o consumo. As ferramentas do geoprocessamento como a amostragem georreferenciada para localização das coletas, interpolação para estimar os valores de locais não amostrados e elaboração de mapas temáticos para visualização da variabilidade espacial da qualidade da água distribuída, seriam importantes para auxiliar na gestão do sistema de distribuição de água.

De acordo com a portaria MS 2914, os responsáveis pelo controle de qualidade da água do sistema de distribuição, devem planejar as coletas, efetuar os ensaios de acordo com a recomendação e avaliar se atendem aos limites estabelecidos. Encontradas características que não atendem ao padrão de potabilidade da água, o responsável pelo controle de qualidade deve tomar medidas como: aumentar o número mínimo de amostras, a frequência de amostragem e análise laboratoriais de parâmetros adicionais. Para o controle de cloro residual livre, cujo limite deve ser maior que 0,2 mg/L e turbidez com valor máximo permitido (VMP) de 5,0 uT, os ensaios devem ser realizados em todas as amostras coletadas para análise microbiológicas e a quantidade de amostras deve ser de acordo com a população abastecida, para um número maior que 250.000 habitantes, a quantidade de amostras deve ser 105 mais 1 para cada 5.000 habitantes, limitado a 1.000 amostras. (BRASIL, 2011).

De acordo com o artigo 6^a da resolução SS 65 (SÃO PAULO, 2005), para acompanhamento da qualidade da água, o responsável pela operação do sistema deve apresentar à autoridade sanitária municipal de sua localidade, o relatório mensal do controle da qualidade da água da rede de distribuição contendo os dados dos parâmetros da qualidade da água das amostras para controle previstas, realizadas e fora do padrão.

De acordo com Franco e Loureiro (2005), foram previstas ações na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) para melhoria no gerenciamento operacionais da rede de distribuição de água, com recursos provenientes da 2^a etapa do Projeto de Despoluição do Rio Tietê. Uma das ações foi a implantação de um SIG na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), denominado Sistema de Informações Geográficas no Saneamento (Signos). Dentre as premissas era a integração ao sistema corporativo, Netcontrol, da empresa para Automação de Laboratórios de Controle Sanitário. O Signos pode ser considerado uma aplicação típica do GIS, representando o traçado de rede de água e esgoto em uma base cartográfica, criando um inter-relacionamento espacial de várias informações alfanuméricas, possibilitando a utilização de programas de modelagem espacial e análises integradas de dados, dentre eles a qualidade da água e técnicas operacionais, com visualização através de mapas temáticos.

Foi efetuado pesquisa de trabalhos científicos relacionados ao uso da geoestatística no controle da qualidade da água potável na rede de distribuição, porém, não foi encontrado artigos referente ao tema.

Quadro de referência teórica

“Geoprocessamento consiste no uso de ferramentas computacionais para tratamento e análise de dados geográficos. O conjunto dessas ferramentas, integrado em Sistema de Informação Geográficas, permite analisar e cruzar dados oriundos de diversas fontes, facilitando a extração de informação e a tomada de decisão”. (TÔSTO et al., 2014, p.94).

Geoestatística, citam os autores, “[...] dedica-se à análise de dados geológicos controlados pela sua distribuição espacial, mas pode perfeitamente ser utilizado em outras áreas que também disponham de dados georreferenciados”. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p.3).

“O fenômeno espacial é o conjunto de todos os valores possíveis da variável de interesse, que define a distribuição e variabilidade espaciais dessa variável dentro de um dado domínio em 2D ou 3D”. (YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p.19)

Água potável: água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido na portaria (BRASIL, 2011, art. 5^o, item II).

Controle da qualidade da água para consumo humano: conjunto de atividades exercidas regularmente pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, destinado a verificar se a água fornecida à população é potável, de forma a assegurar a manutenção desta condição (BRASIL, 2011, art. 5º, item XV).

Rede de distribuição: parte do sistema de abastecimento formada por tubulações e seus acessórios, destinados a distribuir água potável, até as ligações prediais (BRASIL, 2011, art. 5º, item IX).

Variável regionalizada é definido como “[...] qualquer função numérica com uma distribuição e variação espacial, mostrando uma continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser previstas por uma função determinística”. (OLEA, 1975 apud YAMAMOTO; LANDIM, 2013, p. 24).

MATERIAL E MÉTODOS

Planejamento da amostragem

A pesquisa em campo foi efetuada na Cidade de São Paulo, Estado de São Paulo, na rede de distribuição de água potável da região central da região metropolitana, cuja empresa responsável pelo controle de qualidade é a Sabesp. Foi escolhido o setor de abastecimento, que abrange uma área de 23,7 km², onde a água abastecida nesta rede de distribuição é proveniente de um mesmo reservatório. Para realizar um estudo de fenômeno espacial, inicia-se pelo planejamento de amostragem do sistema de distribuição de água potável, porém, nesta avaliação foram utilizados dados, cujo planejamento já é efetuado pela Sabesp, de acordo com o capítulo VI da portaria 2914.

Coleta e ensaios das amostras

As amostras foram coletadas de forma aleatória simples, georreferenciadas e com equipes técnicas devidamente capacitadas. A mesma equipe técnica realizou os ensaios das variáveis turbidez e cloro, utilizando as metodologias analíticas que atendem as normas do SMEWW, cujos ensaios são acreditados no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), atendendo aos requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025.

Armazenamento dos dados

Os dados gerados foram armazenados em banco de dados do controle de qualidade dos ensaios realizados da água distribuída da Sabesp. Foram selecionados área e período de interesse para os estudos e transportados para planilha excel. Estes dados foram carregados no programa ArcGIS, utilizando a função que permite importar as coordenadas geográficas e os valores dos atributos da planilha eletrônica para o programa. Posteriormente os pontos espacialmente georreferenciado com os dados dos atributos, foram exportados para o formato shapefile e efetuados os estudos de avaliação espacial.

Análise geoestatística

Inicialmente realizou-se a análise exploratória dos dados, avaliando o gráfico de boxplot, histograma e dados da estatística descritiva. Foram utilizados os valores das amostras coletadas e com a técnica geoestatística, obteve-se o variograma omnidirecional utilizando-se a equação 1. Posteriormente foi efetuado o ajuste e validação do modelo teórico do variograma experimental, nos modelos esférico, exponencial e gaussiano, utilizando as equações 3, 4 e 5 respectivamente. Foram efetuados análise da validação cruzada, erro quadrático médio conforme equação 7, efeito pepita e alcance. Foi avaliado também o grau de aleatoriedade (E) conforme a equação 2. Após o ajuste e escolha do melhor modelo, foi efetuado a estimativa dos pontos não amostrados, utilizando a krigagem ordinária, conforme a equação 6, para cada parâmetro, gerando o mapeamento da espacialização dos valores estimados das variáveis. Para avaliação da variabilidade dos valores estimados, foram calculados o desvio padrão da krigagem, conforme a equação 8 e gerados o mapeamento da espacialização dos valores obtidos.

RESULTADOS

Coleta de dados

Foram utilizados resultados do monitoramento, referente ao período de 01/07/2014 a 31/07/14.

Análise estatística dos dados

Foram efetuados os cálculos da estatística descritiva para análise exploratória dos dados. Observaram-se de acordo com a tabela 1, que os dados de coeficiente de variação, assimetria e curtose para o ensaio de turbidez apresentaram valores superiores, demonstrando maior variabilidade do atributo no fenômeno estudado. Com relação ao valor da posição central, representados pela média e mediana da população avaliada, verificaram-se que os mesmos estão relativamente próximos nos dois ensaios avaliados. Sendo uma área de estudo de 23,7 km² e 74 pontos amostrados, foi obtido uma densidade amostral de 3,12 amostras por km² no setor avaliado.

Tabela1- Resumo dos valores obtidos na estatística descritiva

Parâmetros	Cloro	Turbidez
Número de dados	74	74
Média	0,738	0,293
Desvio padrão	0,207	0,172
Variância	0,043	0,03
Coeficiente de variação (%)	28	59
Coeficiente de assimetria	0,433	1,327
Coeficiente de curtose	2,24	5,77
Valor mínimo	0,38	0,04
Valor máximo	1,21	0,93
Mediana	0,695	0,27
1º quartil	0,57	0,2
3º quartil	0,92	0,39

Para o ensaio de cloro, verificou-se que na dispersão dos dados, 50% estão entre 0,57 mg/L e 0,92 mg/L, representados na figura 5, e com assimetria positiva, conforme figura 6.

Figura 5: Boxplot dos dados de cloro

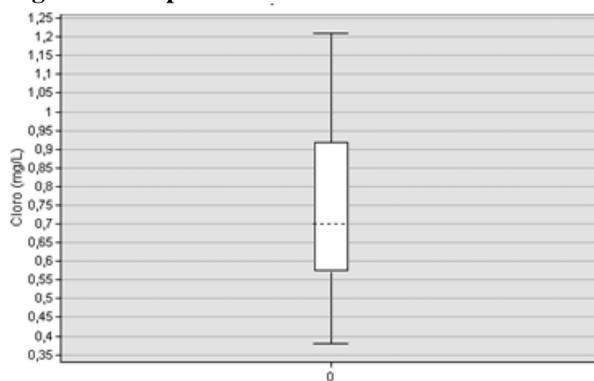
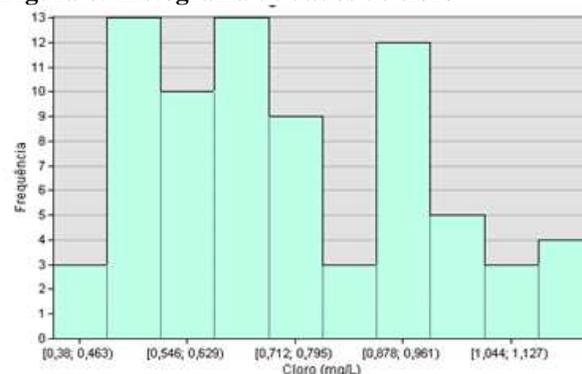


Figura 6: Histograma de dados de cloro



Para o ensaio de turbidez, com relação a dispersão dos dados verificou-se que 50% estão entre 0,20 uT e 0,39 uT, com 3 resultados anômalos da população avaliada, representados na figura 7 e com assimetria levemente positiva, conforme figura 8.

Figura 7: Boxplot dos dados de turbidez

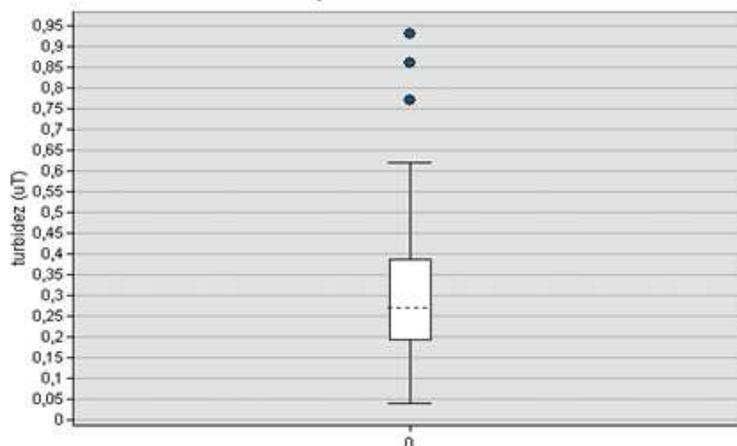
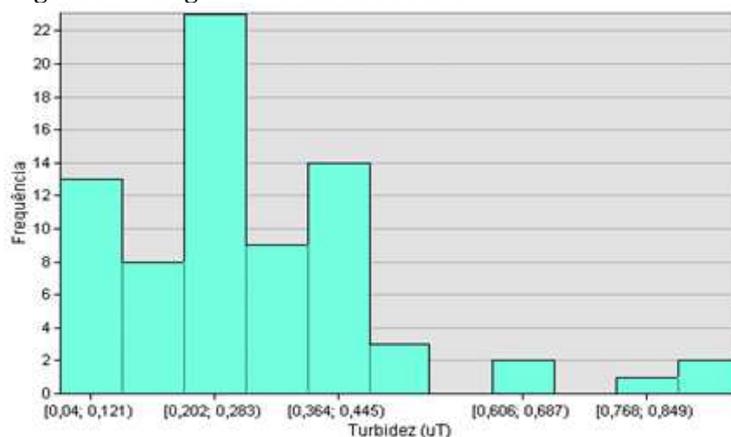


Figura 8: Histograma de dados de cloro



Avaliação do modelo teórico de variograma

Observou-se nos dados da tabela 2 para o ensaio de cloro residual livre, que nos modelos testados, os valores dos variogramas estão relativamente próximos, porém no modelo exponencial apresentou maior valor na amplitude, assim, maior distância da interdependência da variável analisada e menor componente aleatório. Verificou-se também que não há efeito pepita puro, portanto é possível utilizar a técnica geoestatística. Comportamento similar ocorreu para o ensaio de turbidez, conforme tabela 3. Verificou-se no variograma que existe uma dependência espacial de 829 m, que corresponde a 0,829 km. Sendo o variograma utilizado omnidirecional, avaliou-se que o gride de amostragem poderia ser de 0,6872 km², desta forma, teoricamente um plano de amostragem de 35 amostras bem distribuídas, teria a mesma representatividade na estimativa da distribuição espacial deste atributo.

Tabela 2 – Dados dos modelos variográficos para o ensaio de cloro

Modelo	Efeito pepita	Patamar	Amplitude (a)	Variância espacial (C)	Aleatoriedade (E)
	(Co)	(Co + C)	em metros		
Esférico	0,0195	0,0306	699	0,0111	1,76
Exponencial	0,0181	0,0316	829	0,0135	1,34
Gaussiano	0,0187	0,0312	604	0,0125	1,5

Tabela 3 – Dados dos modelos variográficos para o ensaio de turbidez

Modelo	Efeito pepita	Patamar	Amplitude (a)	Variância espacial (C)	Aleatoriedade (E)
	(Co)	(Co + C)	em metros		
Esférico	0,0179	0,0199	1684	0,002	8,95
Exponencial	0,0146	0,0231	1684	0,0085	1,72
Gaussiano	0,0187	0,018	1180	-7E-04	-26,71

Análise de validação cruzada

Analysaram-se visualmente os gráficos de correlação, para o ensaio de cloro residual livre e verificou-se que as correlações entre os valores estimados e medidos nos modelos esférico, exponencial e gaussiano, tiveram comportamento similar. Para valores medidos abaixo da média, há tendência de estimativa mais alto e para valores medidos altos, há tendência de estimativa mais baixo, conforme figuras 9, 10 e 11. Observações visuais similares ao ensaio de cloro foram verificados para o ensaio de turbidez, conforme figuras 12, 13 e 14.

Figura 9 – Cloro no modelo esférico

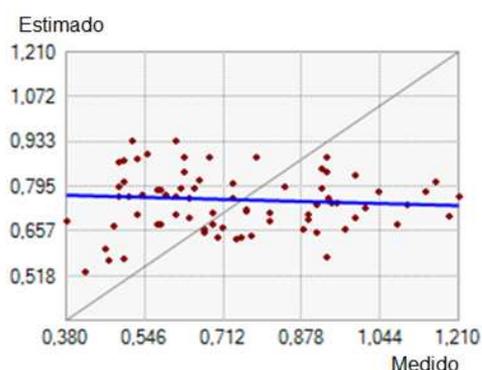


Figura 10 – Cloro no modelo exponencial

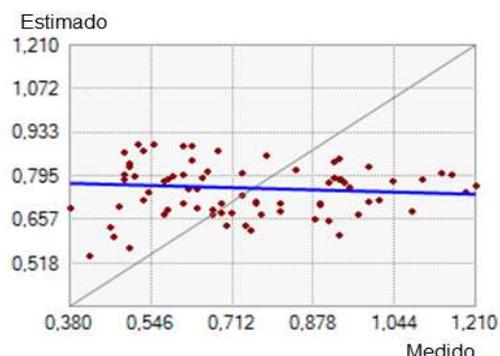


Figura 11 – Cloro no modelo gaussiano

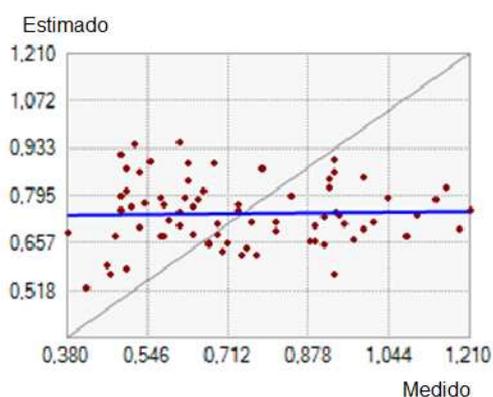


Figura 12 – Turbidez no modelo esférico

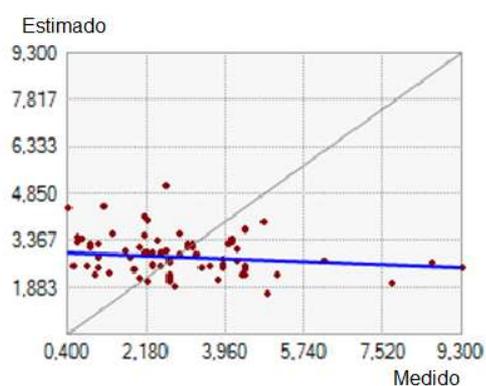


Figura 13 – Turbidez no modelo exponencial

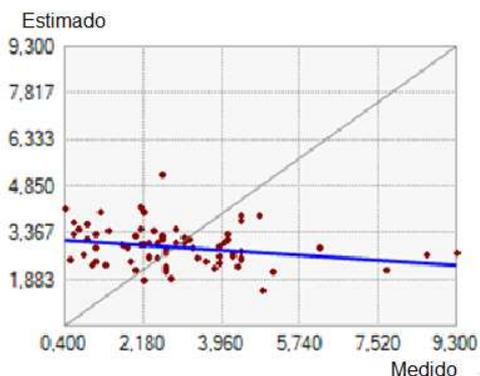
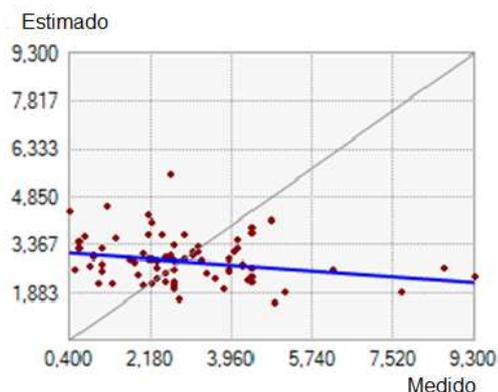


Figura 14 - Turbidez no modelo gaussiano



Análise do erro da estimativa

Foi calculado o erro quadrático médio (EQM) e posteriormente o RMSE para cada modelo de variograma experimental e verificou-se que o modelo de variograma experimental exponencial apresentou menor RMSE para os atributos de cloro e turbidez, conforme observado na tabela 4.

Tabela 4 – Erro quadrático médio para os diferentes modelos variográficos

Modelo	EQM		RMSE	
	Cloro	Turbidez	Cloro	Turbidez
Esférico	0,225	0,196	0,474	0,443
Exponencial	0,221	0,195	0,470	0,442
Gaussiano	0,226	0,201	0,475	0,448

Krigagem

Conforme foi avaliado na tabela 2 e 3, o melhor modelo de ajuste foi o exponencial para os ensaios de cloro e turbidez avaliados. Na análise da validação cruzada não foi possível escolher o melhor modelo. Na avaliação da estimativa do erro na tabela 4, o modelo exponencial foi o que apresentou melhor resultado para os ensaios de cloro e turbidez. Desta forma o modelo exponencial foi utilizado para efetuar a estimativa dos valores para os locais não amostrados, utilizando o método de krigagem ordinária.

Interpolação de turbidez

Construiu-se os mapas temáticos do teor e desvio padrão da estimativa turbidez, com divisão de 10 classes de valores. Verificou-se que na distribuição espacial da concentração estimada deste atributo apresentou, em algumas áreas, valores pontuais de 0,77 uT, 0,86 uT e 0,93 uT, conforme figura 15, acima da média encontrada na população avaliada, entretanto, os mesmos estão dentro do critério de VMP da portaria MS 2914 que deve ser menor que 5,0 uT. Estes resultados estão visualmente em destaque, confirmando o que foi verificado como valores anômalos na figura 7 de boxplot de dados de turbidez. Este fato confirma que a krigagem é um método geoestatístico que tem a vantagem de indicar anomalias locais, sendo explicado pelo Furuie, (2009). Ainda, verificou-se na figura 15, que os resultados medidos estão dentro da faixa dos valores estimados ou bem próximo da faixa, desta forma confirmando que a técnica geoestística utilizada na interpolação dos dados, reflete a realidade medida em campo. Utilizou-se o plano de amostragem aleatória simples e na interpolação, a krigagem ordinária, assim, entendeu-se que neste estudo as estimativas foram satisfatórias e a técnica adequada.

Na distribuição espacial do desvio padrão, construiu-se o mapa temático com 10 classes de valores, conforme figura 16, representando a variabilidade da estimativa, cuja variável representa o erro associado ao valor medido e o estimado, observado pelo Longley et. al., (2013). Observou-se menor desvio padrão nas regiões em que há maior concentração de amostragem, sendo que este fato ocorre na maior parte da área estudada.

Verificou-se maior variabilidade da estimativa nas áreas em que as distâncias entre os pontos amostrados foram maiores, desta forma, verificou-se que o erro é maior quando o espaçamento entre os pontos amostrados aumenta.

Figura 15 – Distribuição espacial do teor de turbidez

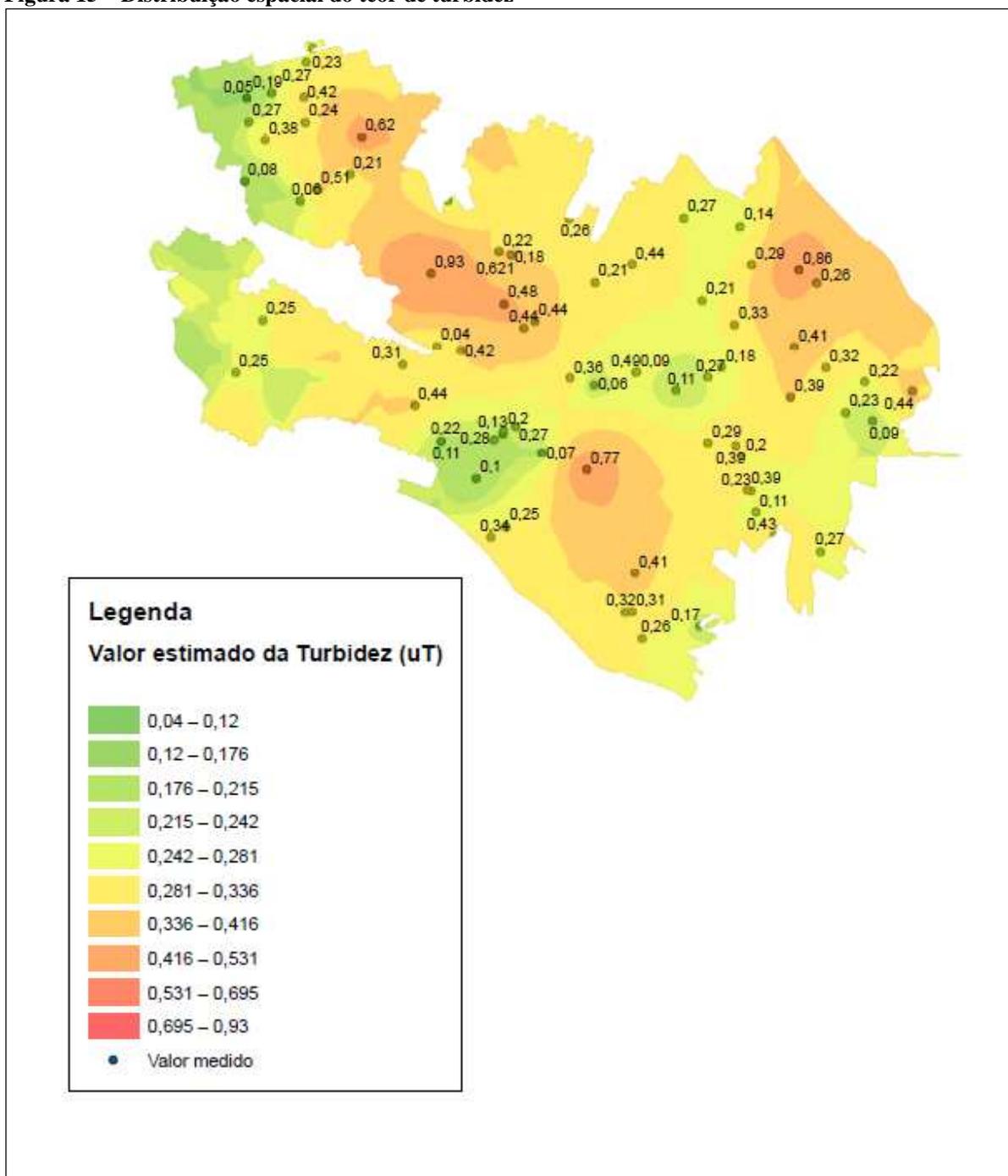
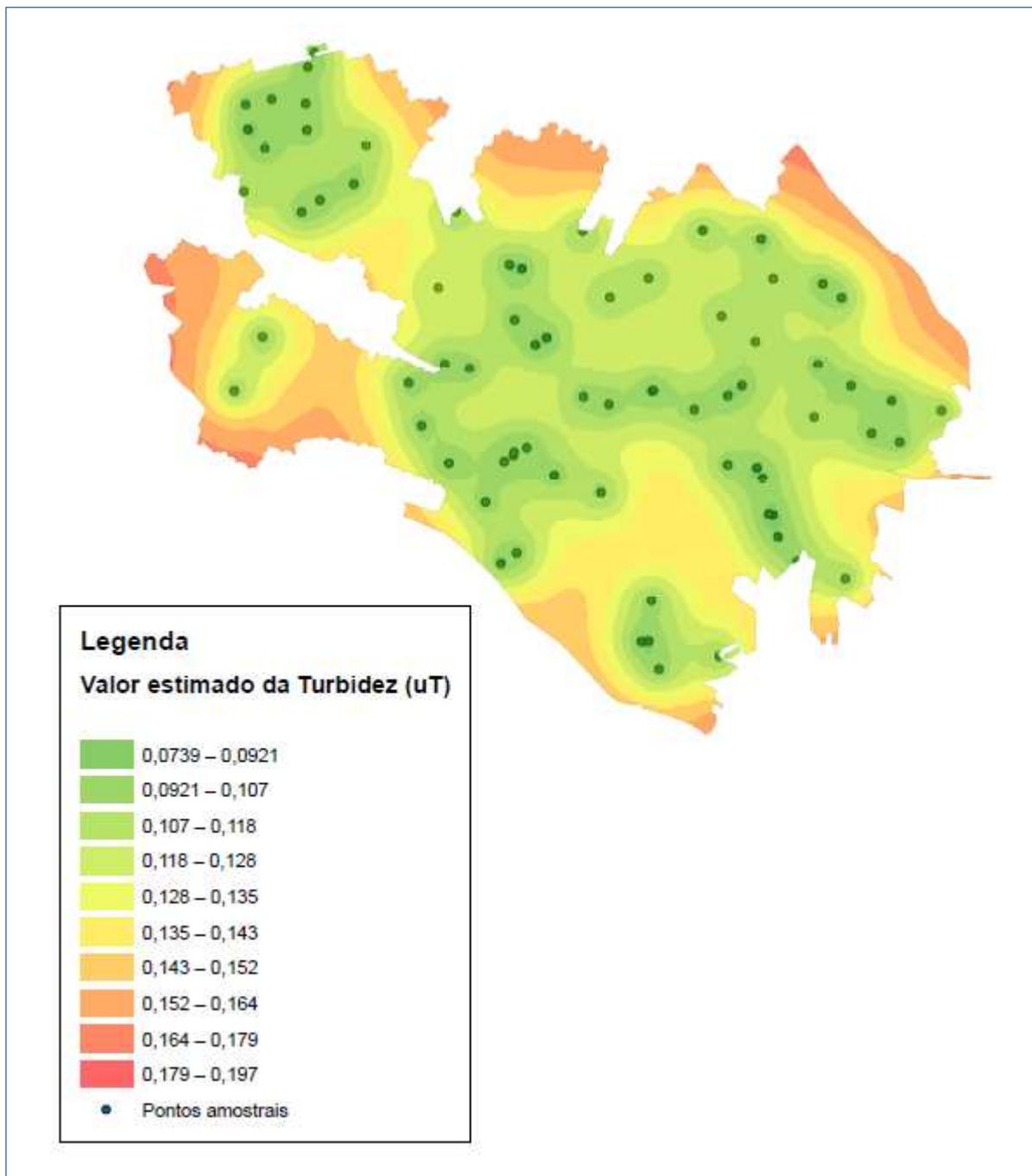


Figura 16 – Distribuição espacial do desvio padrão do teor de turbidez



Interpolação de Cloro residual livre

Construiu-se os mapas temáticos de teor, variando de 0,38 mg/L a 1,21 mg/L e desvio padrão da estimativa cloro residual livre, variando de 0,097 mg/L a 0,185 mg/L, divididos em 10 classes de valores. Verificou-se conforme figura 17, que na distribuição espacial da concentração deste atributo, apresentou uma leve tendência, com maior concentração em uma região e diminuindo gradativamente para outra região, porém os resultados estão dentro do critério de VMP da portaria MS 2914, cujos valores devem ser maior que 0,2 mg/L. Verificou-se na figura 17, que os resultados medidos estão dentro da faixa dos valores estimados ou bem próximo da faixa, assim a técnica geoestística utilizada na interpolação dos dados deste atributo também reflete a realidade de campo. As amostras foram coletadas no mesmo ponto onde foi coletada a amostra para ensaio de turbidez, portanto, as observações da amostragem para o cloro residual livre são similares a avaliação da amostragem de turbidez.

Na distribuição espacial do desvio padrão, conforme figura 18, verificou-se fenômeno espacial equivalente ao da turbidez, portanto, as verificações deste atributo, também é similar ao que se observou na turbidez.

Figura 17 – Distribuição espacial do teor de cloro

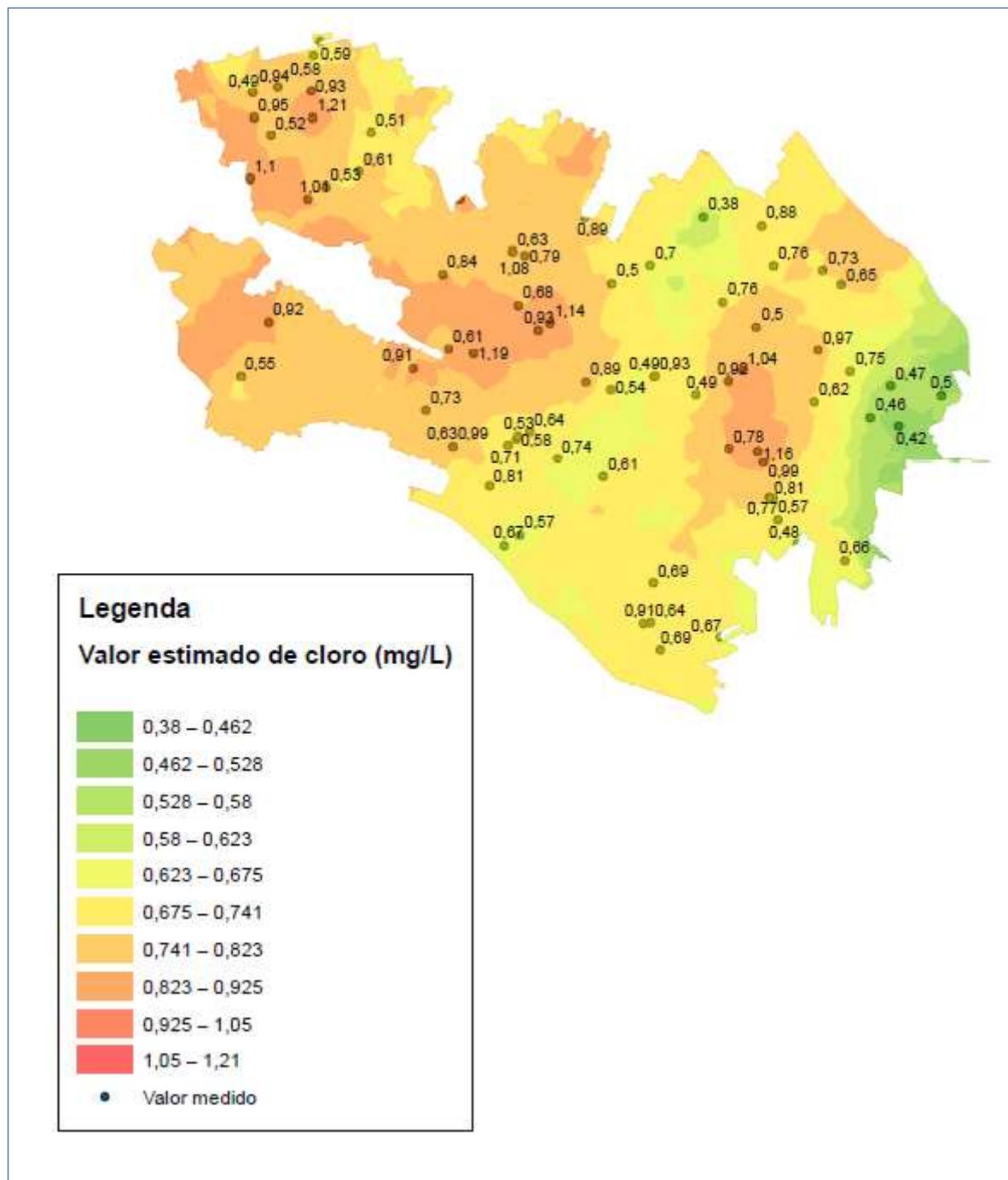
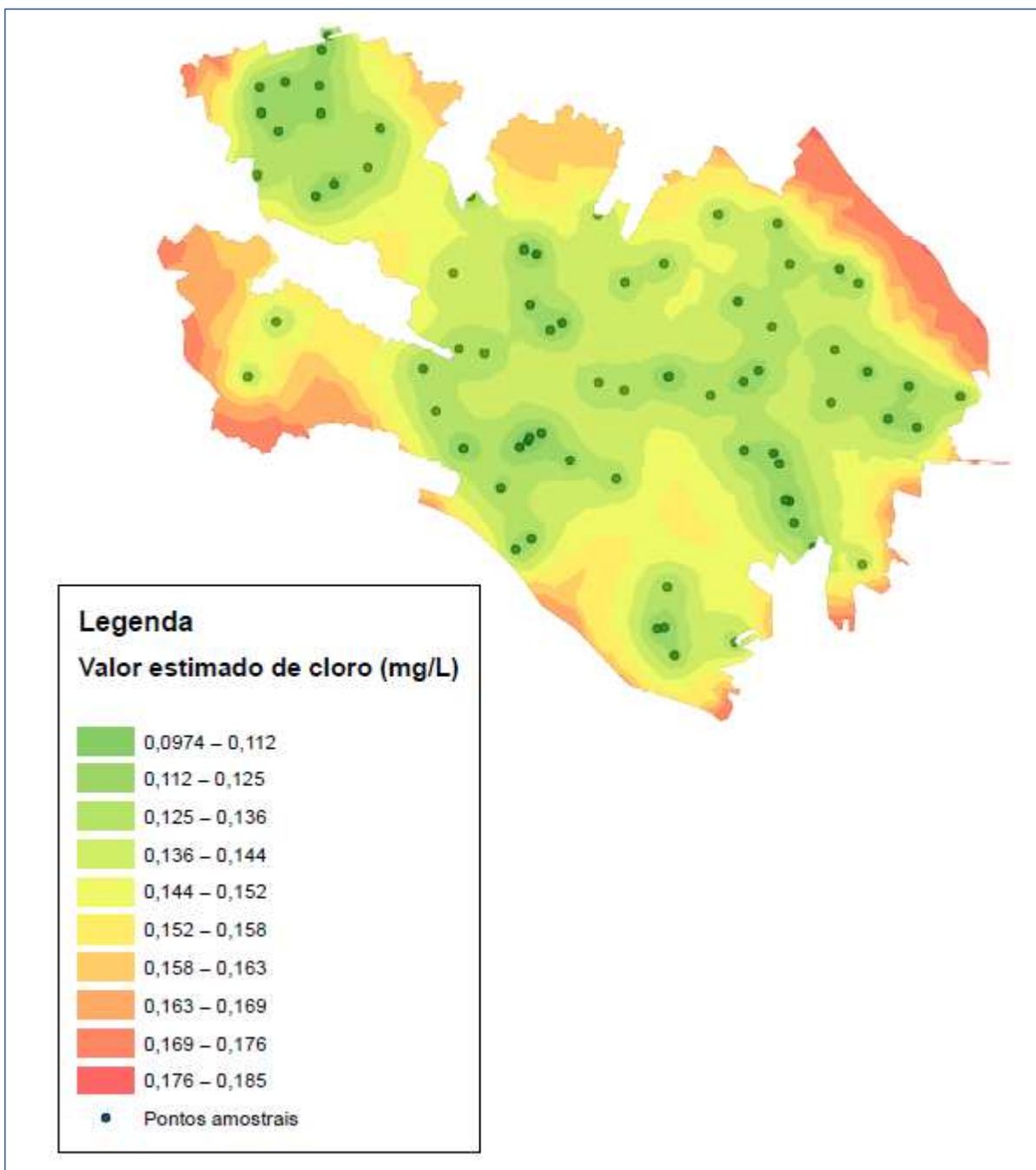


Figura 18 – Distribuição espacial do desvio padrão do teor de cloro



CONCLUSÕES

Verificou-se que não há uma recomendação da portaria MS 2914 de análise crítica, considerando as variabilidades espacial e temporal dos atributos controlados, quando encontradas características que não atendem ao padrão de potabilidade.

Avaliou-se o alcance da interdependência dos atributos e observou-se que, com um número menor de amostras, mas com gride amostral melhor distribuída, poderia obter a mesma representatividade na avaliação da variabilidade dos atributos, porém esta constatação é necessária novos estudos, executando a amostragem dos diferentes grides amostrais e posterior comparação da interpolação.

Utilizando-se o método geoestatístico efetuou-se a análise variográfica e o modelo variográfico exponencial apresentou melhor desempenho. Construiu-se o mapa temático da distribuição espacial dos teores analisados da qualidade da água. Verificou-se no mapa interpolado de turbidez que foi possível identificar valores pontuais anômalos. Geralmente as anomalias estão associadas a algum problema na rede de distribuição de água, então, essa informação ajudaria na tomada de decisão para priorizar ou executar possível necessidade de intervenções corretivas nestas áreas.

Observou-se no mapa interpolado de cloro residual livre, uma tendência de diminuição gradativa da concentração de uma região para outra. Esta verificação pode ser utilizada para avaliar o comportamento da demanda de cloro na zona de abastecimento de um reservatório de abastecimento de água, entretanto esta inferência deve ser melhor avaliada, efetuando estudos em conjunto com o fluxo da água na rede de distribuição, estimativa do tempo de retenção da água na rede e possíveis reações químicas e biológicas.

Verificou-se que os resultados medidos estão dentro da faixa dos valores estimados ou bem próximo desta faixa, refletindo a realidade medida em campo. Verificou-se também maior variabilidade da estimativa do desvio padrão onde as distâncias entre os pontos amostrados foram maiores.

Observou-se nos gráficos deste estudo, a existência de potencialidades para utilização da técnica do geoprocessamento na análise espacial da qualidade da água na rede de distribuição, entretanto, para implementação da mesma como técnica de auxílio na gestão da qualidade são necessárias mais avaliações para comprovação deste potencial, principalmente em outros setores de abastecimento.

Os resultados mostraram que há evidências da possibilidade de uso do geoprocessamento para analisar a distribuição espacial da qualidade da água e auxiliar no planejamento da distribuição espacial dos pontos amostrados.

Diante das evidências, conclui-se que é possível utilizar a geoestatística para auxiliar na gestão do controle de qualidade de água potável na rede de distribuição.

RECOMENDAÇÕES

Outros estudos podem ser realizados com uso da técnica do geoprocessamento, como:

- Verificar se a amostragem recomendada pela Portaria MS 2914 para avaliação da qualidade de água pode ser otimizada, utilizando a tecnologia do geoprocessamento na avaliação de dados espacial dos atributos controlados;
- Avaliar se é possível otimizar a aplicação da concentração de cloro, verificando o comportamento espacial da demanda, todavia, mantendo a mesma segurança da potabilidade da água distribuída;
- Efetuar análise de dados espacial e temporal dos atributos da qualidade da água distribuída, auxiliando o entendimento do comportamento dos fenômenos dos atributos da qualidade da água na rede de distribuição;
- Estudar regiões com potencial de riscos e impactos ambientais provocados por agroquímicos, levando em consideração os princípios ativos dos produtos utilizados na bacia hidrográfica do manancial de contribuição e a sazonalidade das culturas;
- Avaliar a distribuição espacial de outros parâmetros, efetuando análise conjunta e correlacionada com as informações já existente em Sistemas de Informações Geográficas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. Washington, 2012.
2. ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji. Sistema de informações geográficas: Aplicações na agricultura. Brasília: Embrapa, 2ª edição, 1998.

3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração: NBR 17025. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
4. BRASIL. Portaria nº 2.914, de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da saúde.
5. CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 06 setembro 2014.
6. DRUCK, Suzana; CARVALHO, Marília Sá; CÂMARA Gilberto; MONTEIRO Antonio Miguel Vieira. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília: Embrapa, 2004.
7. FRANCO, Silvana; LOUREIRO, Maurício. Sistema de Informações Geográficas no Saneamento. In. Prêmio Mario Covas, ciclo 2005. Anais eletrônicos. São Paulo: TT 274, 2005. Disponível em: http://www.premiomariocovas.sp.gov.br/2013/2_premiados.asp. Acesso em: 04 novembro 2014.
8. FURUIE, Rafeak de Aguiar. Estudo comparativo de métodos geoestatísticos de estimativas e simulações estocásticas condicionais. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, 166p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo: USP, 2009.
9. LANDIM, Paulo M. Barbosa. Introdução a análise estatística de dados geológicos multivariada. 2010. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/MULTIVAR.pdf>>. Acesso em: 02 outubro 2014.
10. LANDIM, Paulo M. Barbosa. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. DGA.IGE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, 2000. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/interpo.pdf>> Acesso em: 05 setembro 2014.
11. LANDIM, Paulo M. Barbosa; STURARO, José Ricardo. Krigagem Indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Geomatemática, Texto Didático 6, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, 2002. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/kindicativa.pdf>> Acesso em: 28 setembro 2014.
12. LONGLEY, Paul A.; GOODCHILD, Michael F.; MAGUIRE, David J.; RHIND, David W. Sistemas e ciência da informação geográfica. Porto Alegre, 3ª edição, 2013.
13. MEIRELLES, Margareth Simões Penello; CAMARA, Gilberto; ALMEIDA, Cláudia Maria de. Geomáticas: Modelos e aplicações ambientais. Brasília: Embrapa, 1ª edição, 2007.
14. MIRANDA, Jose Iglelmar. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010.
15. MORENO, José; QBAR, Nizar; ONOFRE, Regina Mei; SOUZA, Roseane Mª Garcia Lopes de. Manual de controle da qualidade e operação do sistema de abastecimento de água. São Paulo, 1ª edição, 2012.
16. RIBEIRO, Arlea Ayrán de Souza. Aplicações de sistemas de informações geográficas em empresas de Saneamento. Espírito Santo, UNICSUL – 2012.
17. SÃO PAULO. Secretaria de Estado da Saúde. Resolução SS 65 , de 12 de Abril de 2005. Estabelece os Procedimentos e Responsabilidades Relativos ao Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano no Estado de São Paulo e dá outras providências. Coordenadoria de controle de doenças. Centro de Vigilância Sanitária do Estado de São Paulo.
18. SILVA, Jorge Xavier da; ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento & Análise Ambiental. Aplicações. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2013.
19. TÔSTO, Sérgio Gomes; RODRIGUES, Cristina Aparecida Gonçalves; BOLFE, Édson Luis; BATISTELLA, Mateus. Geotecnologias e Geoinformação: O produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2014.
20. YAMAMOTO, Jorge Kazuo; LANDIM Paulo M. Barbosa. Geoestatística: Conceitos e aplicações. São Paulo, Oficina de Textos, 2013.