

ANÁLISE COMPARATIVA E ESTATÍSTICA ENTRE CARGA E CONCENTRAÇÃO NO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS URBANOS

Camila de Carvalho Almeida^{1}; Cristovão V. Scapulatempo Fernandes², Heloise G. Knapik³ &
Marianne S. França Sieciechowicz⁴*

Resumo – Este trabalho apresenta uma análise crítica e suas possíveis implicações em gestão de recursos hídricos considerando o monitoramento de distintos parâmetros de uma bacia hidrográfica urbanizada. A metodologia utilizada baseia-se numa consolidação da base de dados hidrológicos e de qualidade da água que permitiu integrá-los a uma matriz dinâmica de fontes distintas de poluição. Nesta pesquisa, um novo conceito para a interpretação dos parâmetros de qualidade da água é utilizada com base na combinação da análise estatística tradicional e multivariada de dados de concentração e de carga. Os resultados resumem as potenciais implicações positivas de um forte sistema de classificação de qualidade da água integrado a um sistema de apoio à decisão para esta bacia que certamente vai induzir estratégias para a recuperação do sistema de qualidade da água do rio.

Palavras-Chave – gestão de recursos hídricos, estatística multivariada.

COMPARATIVE ANALYSIS AND STATISTICS BETWEEN LOAD AND CONCENTRATION IN MONITORING WATER QUALITY IN URBAN RIVERS

Abstract – This paper presents a critical analysis and potential water quality implications considering monitoring of distinct water quality parameters of a urbanized watershed. The methodology used relies on a consolidation of hydrological and water quality data base that allowed integrate them to a dynamic matrix of distinct sources of pollution. In this research, a new concept for interpretation of water quality parameters is used based upon the combination of traditional statistical analysis of concentration and source load data integrated to multivariate statistical analysis. The results summarize the potential positive implications of a strong water quality classification system integrated to a decision support system to this basin that will certainly induce strategies for the water quality recovery of the river system.

Keywords – water resources management, statistical analysis;

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade da água é imprescindível na gestão de recursos hídricos, pois além de permitir que se conheça o que ocorre na bacia em estudo, possibilita traçar ações e metas que visem a melhoria da qualidade de água da bacia ao longo do tempo.

¹ Universidade Federal do Paraná, carvalho_camila@ymail.com

² Universidade Federal do Paraná, cris.dhs@ufpr.br

³ Universidade Federal do Paraná, heloise.dhs@ufpr.br

⁴ Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, marianne.franca@lactec.org.br

Apesar disso, a rede de monitoramento atualmente vigente na maioria das principais bacias hidrográficas brasileiras está defasada, ora em amplitude espacial, com poucos pontos de amostragem, ora em amplitude temporal, com extensos períodos de falhas. O reflexo dessa inadimplência com o monitoramento, e da maneira como ele é realizado, acaba por refletir na gestão dos recursos hídricos, com ações tardias ou ineficientes em determinadas regiões.

Quando se consegue realizar um monitoramento mais longo, a dificuldade está em analisar o conjunto de dados gerado que é grande e complexo, pois é composto de diversas variáveis que interagem entre si e que são medidas em diferentes escalas. Uma forma de se avaliar grandes conjuntos de dados é a aplicação de métodos estatísticos, e como o que se deseja na prática é analisar o conjunto simultaneamente, a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas seria bastante indicado, visto que possui esta vantagem. No âmbito da gestão de recursos hídricos, uma vantagem do emprego de técnicas de análise estatística multivariada, segundo Nonato *et al.* (2007), é a possível otimização da rede de amostragem proposta bem como da frequência de amostragem e do número de parâmetros analisados, visto que programas de monitoramento são dispendiosos.

No Brasil, os padrões e as condições que as águas devem apresentar são estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05, porém, há alguns fatores que estão ligados diretamente à qualidade da água que não são abordados. Alguns ensaios que possibilitam um entendimento mais aprofundado da dinâmica da matéria orgânica acabaram por não terem seu uso normalizado, como por exemplo, a determinação do carbono orgânico (KNAPIK, 2009). Além disso, nota-se que os padrões são estabelecidos somente em função de concentrações, o que não permite avaliar o efeito das alterações de vazões. De acordo com Tucci (1998), a concentração não tem representatividade temporal e espacial, já que a mesma se altera com a vazão envolvida. Pode-se dizer, portanto, que avaliar a qualidade de um corpo hídrico levando em conta somente a concentração, como indicado na Resolução, não é necessariamente o mais adequado.

Diante de todas essas peculiaridades que envolvem o estudo de qualidade da água, uma análise crítica mais abrangente, que englobe diferentes técnicas de interpretação dos dados de monitoramento se faz necessária. Uma abordagem distinta é possível através da observação da variação de cargas e dos resultados obtidos com estatística multivariada, o que pode promover uma nova visão para aplicação em planejamento e instrumento de gestão de recursos hídricos.

Sendo assim, objetivo do presente estudo é avaliar a dinâmica de concentração e carga poluente integrada aos resultados obtidos pelas técnicas de análise de componentes principais e análise fatorial na Bacia do Alto Iguaçu através do monitoramento quali-quantitativo realizado desde 2005.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Bacia do Alto Iguaçu, localizada na Região Metropolitana de Curitiba, é altamente povoada e industrializada e não conta com um completo e eficiente sistema de saneamento básico, o que acaba se refletindo na forma de poluição hídrica.

De acordo com a Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba (COMEC), a região envolve atualmente 29 municípios, com uma população que passa dos três milhões de habitantes.

Um trecho dessa região, atravessado pelos rios Iraí e Iguaçu é caracterizado pela planície plana, com uma grande extensão de várzeas naturais, que em alguns trechos são intensamente exploradas para extração de areia. Estas regiões, juntamente com as áreas de mananciais, vêm passando por um crescente processo de ocupação irregular, que acaba interferindo ainda mais na qualidade da água da bacia (FRANÇA, 2009).

Para o monitoramento, foram escolhidos estrategicamente seis pontos de forma a abranger toda a região e serem de fácil acesso, com eles, foi possível estudar 107 km do Rio Iguaçu.

2.2 Monitoramento da qualidade da água

A avaliação da qualidade da água apresentada no presente estudo está vinculada ao Projeto “Bacias Críticas: Bases Técnicas para a definição de Metas Progressivas para seu Enquadramento e a Integração com os demais Instrumentos de Gestão” (PORTO *et al.*, 2007), desenvolvido em parceria entre a UFPR e a USP, durante o período de 2005 a 2007. Foram utilizados dados de 35 campanhas de monitoramento.

Os parâmetros físico-químicos determinados *in situ* através de sensores foram: oxigênio dissolvido (OD, em mg/L), temperatura da água (°C), condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e turbidez (NTU). Amostras de água foram coletadas para posterior análise dos seguintes parâmetros de qualidade da água: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio orgânico (N_{org}), nitrogênio amoniacal (N_{NH₃}), nitrito, nitrato, fósforo total, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e carbono orgânico dissolvido (COD). Também foi analisada a profundidade Secchi e a vazão nos pontos monitorados.

2.3 Método de análise estatística

Uma primeira análise da variação espaço-temporal dos dados monitorados foi realizada para os dados de carga e concentração através de diagramas box-plots. Na aplicação da estatística multivariada, foram realizadas as análises de componentes principais (ACP) e fatorial (AF), com a utilização do software *R: A language and environment for statistical*.

A ACP é utilizada para reduzir a dimensão de bancos de dados com muitas variáveis inter-relacionadas através da criação de um conjunto, chamado de componentes principais (CPs), que contem as variáveis mais representativas do problema estudado. Assim como a ACP, a análise fatorial tem como objetivo diminuir bancos de dados com muitas variáveis relacionadas, o que é feito através da criação de fatores, chamados fatores comuns, que são não correlacionados entre si e que supostamente medem aspectos comuns do conjunto de dados. Os fatores são obtidos a partir da estrutura de dependência entre as variáveis e com eles é possível saber o quanto cada fator está associado a cada variável e quanto o conjunto de fatores explica a variabilidade total dos dados (BARROSO e ARTES, 2003).

Essas técnicas foram aplicadas aos dados de concentração e de carga referentes à Bacia do Alto Iguaçu a partir de uma matriz contendo os dados de todos os pontos de monitoramento nas linhas e os parâmetros de qualidade de água nas colunas. Optou-se por excluir as linhas com dados faltantes, para evitar interferências no resultado final. Para concentração foram consideradas como variáveis 19 parâmetros de qualidade da água (DBO, DQO, COD, turbidez, profundidade Secchi, SDT, SST, SS, condutividade, pH, temperatura, OD, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, nitrato, nitrito, nitrogênio total, fósforo total e vazão) e como observações 87 coletas realizadas nos

pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6, resultando, portanto numa matriz 87 por 19. Para carga, foram considerados os mesmos 19 parâmetros, porém 84 coletas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise estatística multivariada

Na ACP utilizou-se o Critério de Kaiser para definir o número de componentes principais a serem retidas, que foram as com autovalores maiores que 1. Dessa forma, considerando-se a análise de concentração, 6 principais componentes explicariam 75% da variância do banco de dados e para carga 5 componentes com 82% da variância sendo explicada. Os pesos das variáveis originais nas CPs foram determinados pelos valores de correlação entre os escores das CPs e as variáveis originais. Tendo como resultado, para concentração a DBO, a DQO, o nitrogênio amoniacal e o total, todos encontrados na primeira CP, já para carga encontrou-se 10 variáveis (DBO, DQO, COT, SDT, SST, N_{NH₃}, N_{org}, nitrito, nitrogênio total e vazão) na primeira CP e pH e SS na segunda.

Na AF, primeiramente observou-se o gráfico de distribuição Qui-Quadrado dos dados para ver se os mesmos apresentavam distribuição normal, o que ocorre somente com os referentes à concentração. Os dados de carga formam uma matriz singular e que, portanto, tem um discriminante nulo, logo, não apresenta matriz inversa e sendo assim não tem distribuição normal. Isto não impede que a AF seja executada. Em seguida, foi realizado o Teste de Esfericidade de Bartlett que resultou num p-valor nulo e 171 graus de liberdade tanto para concentração quanto para carga. Um outro valor que precisa ser calculado previamente é a Medida de Adequacidade de Kaiser Meyer Olkin que resultou em 0,5 para concentração e para carga não pôde ser calculada pelas condições já expostas anteriormente. Depois de todas as verificações necessárias a AF foi realizada a partir do critério de Kaiser, já utilizado na ACP, sendo retidos 6 fatores para os dados de carga que explicaram 75% da variância da amostra para o método das CP's e 62% para o método da máxima verossimilhança. Na análise de carga, 5 fatores explicaram aproximadamente 82% da variância.

Realizou-se a rotação varimax e para carga encontrou-se como parâmetros com maior peso no Fator 1 o nitrogênio amoniacal e total, no Fator 3 condutividade e pH, no Fator 4 a turbidez e COT e no 5 a temperatura. Os primeiros resultados obtidos para concentração que apresentavam comunalidades superiores a 0,5 passaram por uma nova AF, resultando em 3 fatores capazes de explicar 58% da variância da amostra, com apenas 8 parâmetros: DBO, SST, condutividade, pH, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, nitrogênio total e fósforo.

3.1 Variação espaço temporal

Para observar a variação espaço-temporal da qualidade da água na Bacia do Alto Iguaçu escolheu-se os parâmetros encontrados em comum na aplicação da ACP e da AF, pois numa análise preliminar eles parecem ser os mais representativos.

Na Figura 2 (a) as medianas da concentração de DBO permaneceram próximas de 10 mg/L, com exceção do P1, que se encontra em área de mananciais, apresentando melhor qualidade de água. Cabe destacar que valores máximos variaram entre 40 e 90 mg/L, mostrando a variabilidade espacial da dinâmica da matéria orgânica. Observam-se ainda valores de DBO que ultrapassam o limite disposto pela Resolução CONAMA 357/05, de 5 mg/L, para rios Classe 2, que é o caso do

Rio Iguçu. Do ponto de vista do aporte de carga, na Figura 2 (b) observa-se um aumento nos valores das medianas nos trechos monitorados a jusante, indicando o efeito de aporte de cargas no trecho final da bacia.

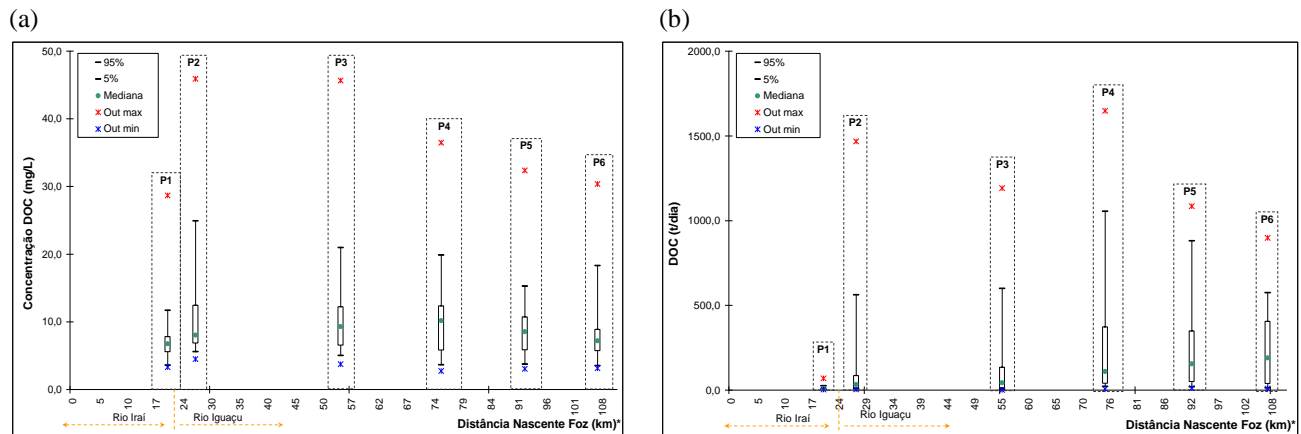


Figura 2 - Variação temporal e espacial da concentração DBO (a) e carga de DBO (b).

A análise do parâmetro DOC, indica fortes concentrações na faixa de 10 mg/L, com valores máximos entre 35 e 45 mg/L conforme a Figura 3 (a). Em termos de carga, as medianas apresentam um aumento até o valor de 189 t/dia no P6, como mostra na Figura 3 (b), indicando um aumento do aporte de cargas orgânicas no decorrer da bacia.

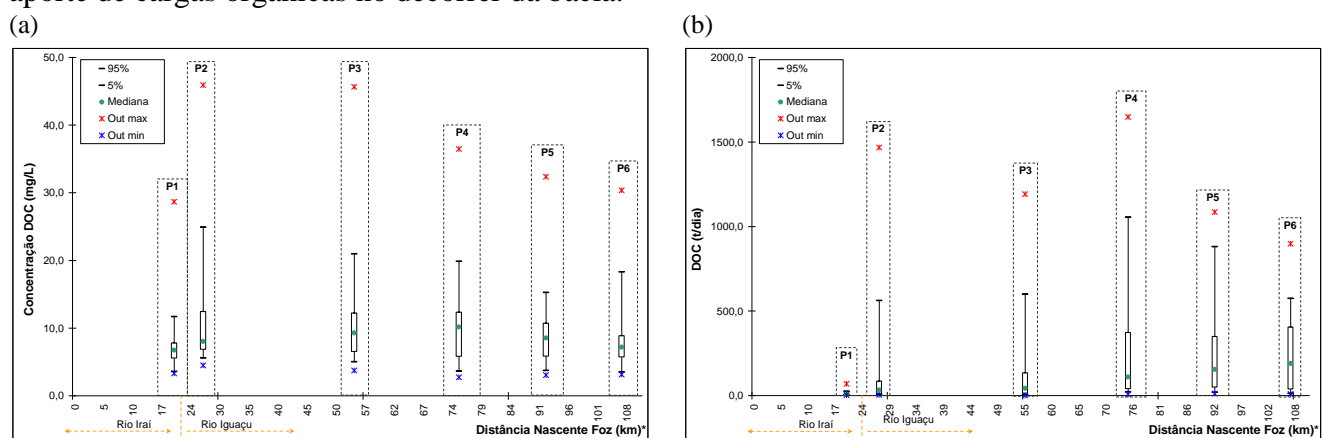


Figura 3 - Variação temporal e espacial da concentração DOC (a) e carga de DOC (b).

A Figura 4 (a) e (b) destaca os valores totais de nitrogênio, além da variação espaço-temporal indicada. É possível identificar que os pontos P4 e P5 são os que apresentam maiores medianas, 27,72 e 29,01 t/dia respectivamente. Sendo o valor máximo observado no P4 (306,77 t/dia) e a maior variação no tempo no P5. Na Figura 4 (a) não é possível determinar qual o ponto mais singular, sendo que todos apresentam medianas muito parecidas, cerca de 7,5 mg/L, nota-se ainda que do P2 até o P5 há uma grande variação nos valores medidos.

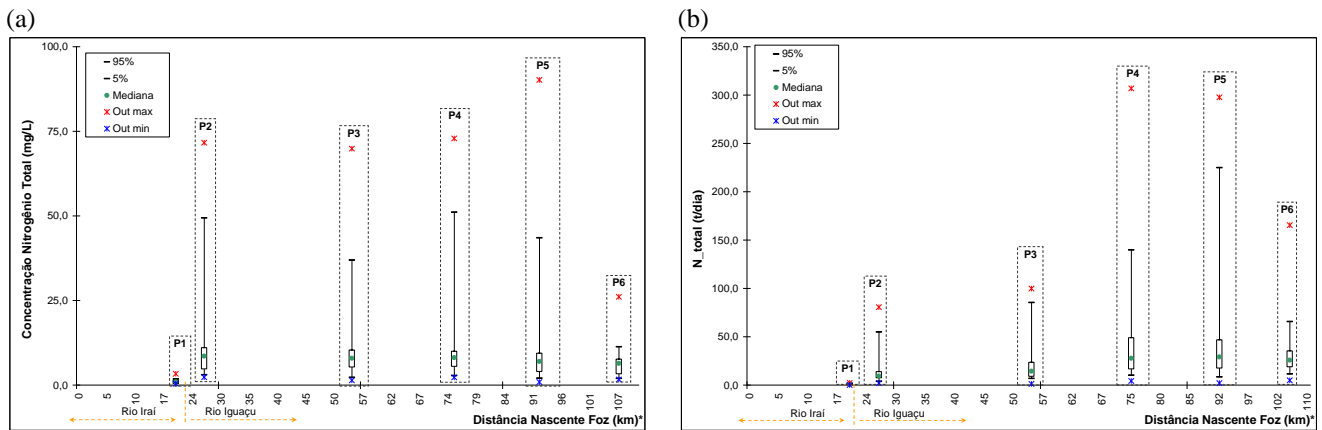


Figura 4 - Variação temporal e espacial da concentração N_Total (a) e carga de N_Total (b).

As concentrações e cargas de sólidos suspensos totais (SST) revelam resultados interessantes. O maior valor de mediana das concentrações ocorreu no ponto P4, com valor de 37 mg/L. É neste ponto que se registrou também os valores máximo de concentração e carga, 284,61 mg/L e 2.491,98 t/dia, respectivamente. Apesar disso, o maior valor de mediana das cargas ocorreu no P5, 194,07 t/dia, isto porque as medianas vão aumentando do P1 até esse ponto, indicando a intensa dinâmica de aporte de sólidos ao longo da bacia.

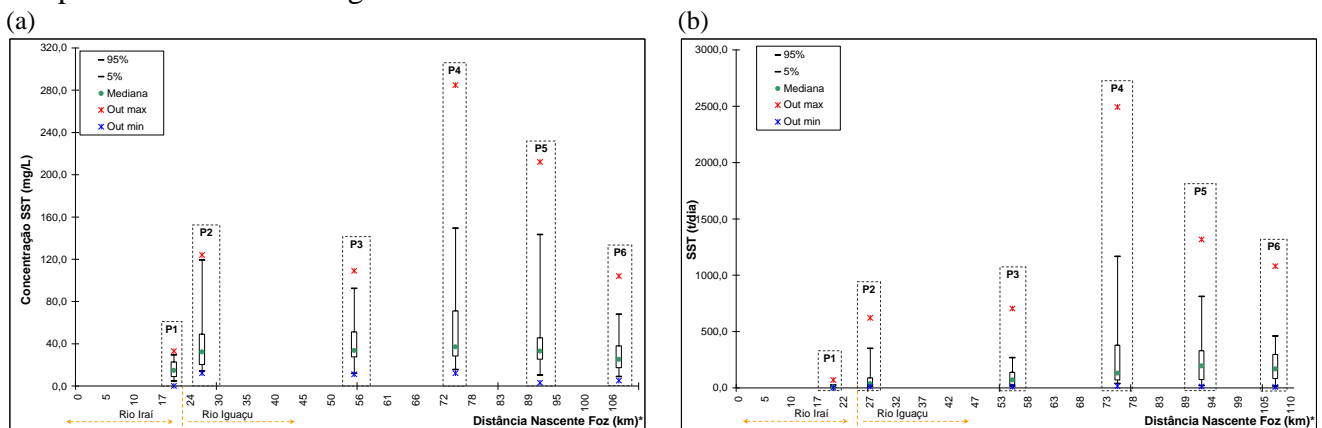


Figura 5 - Variação temporal e espacial da concentração de SST(a) e carga de SST (b).

4. Conclusão

A perspectiva do gestor de recursos hídricos no que concerne à avaliação do potencial de poluição em uma bacia hidrográfica é muito influenciada pela leitura definida pela Resolução CONAMA 357/2005. As concentrações não necessariamente permitem avaliar o efeito das alterações de vazões e sintetizam efeitos físicos, químicos e biológicos. Neste trabalho, apresenta-se uma análise de interpretação de cargas compartilhando efeitos de concentração com os de estimativa de carga, para os principais parâmetros monitorados até o momento na Bacia do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba.

Os parâmetros encontrados pela aplicação das duas técnicas multivariadas estão ligados principalmente à degradação da matéria orgânica, aos sólidos e ao nitrogênio, portanto, a parâmetros que refletem de maneira direta as fontes de poluição ao longo da bacia. Isso não implica que monitorando somente essas variáveis conseguirá se obter um bom diagnóstico da variação da qualidade da água na Bacia do Alto Iguaçu.

Através dos gráficos de carga compila-se melhor o aporte de poluentes na bacia. Quando se observa apenas valores de concentração, não se pode afirmar que a quantidade de poluentes aumentou em determinado trecho do rio uma vez que este aumento pode ter sido ocasionado pela diminuição da vazão. No presente estudo os gráficos de concentração e carga dos parâmetros relacionados à matéria orgânica mostram bem isso. Quando observados somente os gráficos de concentração o ponto P4 é singular. Observando os *box-plots* de carga fica evidente que no trecho do rio a jusante deste ponto há uma quantidade de matéria orgânica maior.

Na série de nitrogênio, por conseguinte, tanto os gráficos de concentração quanto os de carga apresentam medianas bem próximas, mas os do primeiro tipo têm maior variabilidade de dados, apresentando valores maiores que a mediana para maior parte dos parâmetros e pontos de monitoramento. Nota-se que na maioria das vezes o ponto que apresenta maior variação não é o mesmo para concentração e carga. Isto pode ser visto, por exemplo, nos gráficos referentes a nitrogênio amoniacal, onde a variação para os pontos P2 e P5 são praticamente iguais quando se observa valores de concentração. A partir disso, pode-se induzir à interpretação de que nestes pontos a quantidade de poluentes é a mesma, porém, como se observou para as estimativas de carga para o P5 registra-se valores bem maiores que para o P2.

Portanto, pode-se inferir que se fosse preciso escolher em qual trecho do rio seria necessário uma intervenção mais urgente para melhorar a qualidade da água, ações devem ser inicialmente concentradas entre os pontos P4 e P5. Estes pontos são peculiares, pois englobam condições de aporte de carga proveniente de sub-bacias com forte demanda urbana e industrial com impactos significativos sobre os recursos hídricos.

Os valores das medianas para os gráficos de concentração de sólidos são bem próximos, isso poderia indicar que ao longo da bacia não há um aporte significativo de carga contendo sólidos, porém quando se leva em consideração a vazão, fica evidente um aumento de carga poluidora, com exceção do trecho entre os pontos P5 e P6 que apresentam medianas muito próximas. O trecho localizado entre esses pontos é pouco urbanizado, o que justifica essa proximidade, o contrário ocorre entre os pontos P4 e P5.

Finalmente, o que deve ser destacado, é que estas análises só foram possíveis de serem realizadas como consequência da integração quantidade e qualidade da água. Estes resultados configuram uma primeira descrição com esta característica para a Bacia do Alto Iguaçu e permitiram uma avaliação descritiva que não tinha se consolidado até o presente momento para a realidade da região. A contribuição deste artigo é o de incentivar, em bacias críticas, uma visão desta natureza.

Agradecimentos:

Os autores agradecem o apoio financeiro vinculado aos projetos “Bacias Críticas” (MCT/FINEP/CT-Hidro-GRH 01/2004 nº 01 41000 00) e “Integra” (MCT/FINEP/CT-Hidro-IGRH 01/2007).

REFERÊNCIAS

BARROSO, L. P.; ARTES, R. *Análise Multivariada: minicurso do 10º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agrônômica*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.

COMEC – Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Disponível em <<http://www.comec.pr.gov.br>> Último acesso em nov. 2012.

FRANÇA, M. S. *Análise multivariada dos dados de monitoramento de qualidade de água da Bacia do Alto Iguaçu: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

KNAPIK, H. G. *Reflexões sobre monitoramento, modelagem e calibração na gestão de recursos hídricos: estudo de caso da qualidade da água da Bacia do Alto Iguaçu*. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

NONATO, E.A.; VIOLA, Z.G.G.; ALMEIDA, K.C.B.; SCHOR, H.H.R. Tratamento estatístico dos parâmetros da qualidade das águas da bacia do Alto Curso do Rio das Velhas. *Química Nova*, Vol. 30, Nº 4, p. 797-804, 2007.

PORTO, M. F. A.; FERNANDES, C. V. S.; KNAPIK, H. G.; FRANÇA, M. S.; BRITES, A. P. Z.; MARIN, M. C. F. C.; MACHADO, F. W.; CHELLA, M. R.; SÁ, J. F.; MASINI, L. *Bacias Críticas: Bases Técnicas para a definição de Metas Progressivas para seu Enquadramento e a Integração com os demais Instrumentos de Gestão*. Curitiba: UFPR – Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2007. (FINEP/ CT-HIDRO). Projeto concluído.

R CORE TEAM (2012). *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051 – 07 – 0, URL <http://www.R-project.org/>.

TUCCI, C. M. E. **Modelos Hidrológicos**. Coleção ABRH, Porto Alegre, 1998.