

NOTA

CARGA MÁXIMA DE FÓSFORO ADMISSÍVEL AO RESERVATÓRIO PIRAQUARA II, UMA APLICAÇÃO DO PROCESSO TMDL⁽¹⁾

Simone Bittencourt⁽²⁾ & Eduardo Felga Gobbi⁽³⁾

RESUMO

Para implementação e operacionalização da política brasileira de recursos hídricos, é imprescindível o uso de ferramentas de planejamento que considerem o efeito de todas as atividades ou processos que causam ou contribuem para a degradação da qualidade de um corpo d'água. Neste sentido, aplicou-se o processo TMDL (total maximum daily load), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), para o P, na área de drenagem de contribuição ao futuro reservatório Piraquara II, bacia hidrográfica do rio Piraquara, Paraná. O processo TMDL determina a quantidade máxima de cargas de um poluente que um corpo d'água pode receber sem violar os padrões estabelecidos de qualidade da água e aloca cargas deste poluente entre fontes de poluição pontuais e difusas. No presente estudo, utilizou-se o método TMDL, com o objetivo de demonstrar ser ele uma ferramenta útil no processo de gestão dos recursos hídricos. Simularam-se cenários de uso do solo, por meio de modelagem matemática, até obter-se uma concentração de P total no reservatório abaixo da faixa limite para ocorrência de eutrofização, de 0,025 a 0,10 mg L⁻¹, estabelecida no estudo. Realizou-se uma simulação de uso atual do solo, visando prever a condição inicial de qualidade da água no corpo d'água, na qual a concentração de P total no reservatório resultante não atendeu ao padrão estabelecido. Procedeu-se a uma segunda simulação com adoção das medidas de controle, recomposição de mata ciliar e plantio direto, para reduzir a exportação de carga de P total da bacia. Obteve-se uma melhoria na qualidade da água do reservatório, indicando que as medidas adotadas foram suficientes para atingir o padrão estabelecido, o que demonstra a aplicabilidade do método.

Termos de indexação: qualidade da água, planejamento de recursos hídricos, gestão de bacia hidrográfica.

⁽¹⁾ Trabalho extraído da Tese de Mestrado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Recebido para publicação em janeiro de 2004 e aprovado em maio de 2006.

⁽²⁾ Mestranda do Departamento de Transportes, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Centro Politécnico, Bloco V, Jardim das Américas, CEP 81531-970 Curitiba (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: sbittencourt@ufpr.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Transportes, UFPR. E-mail: efgobbi@ufpr.br

SUMMARY: MAXIMUM ALLOWABLE PHOSPHORUS LOAD IN THE PIRAQUARA II RESERVOIR, A TMDL PROCESS APPLICATION

For the implementation and operation of the Brazilian Federal law on water resources of 1997 it is indispensable to use planning tools that take into account the effect of all activities or processes that cause or contribute to the loss of quality of a waterbody. For this purpose, the nutrient phosphorus was evaluated by the TMDL (total maximum daily load) process developed by the United States Environmental Protection Agency – EPA in the drainage area of contribution to the future Piraquara II Reservoir, Piraquara River Watershed, Paraná State, Brazil. The TMDL process determines the maximum amount of a pollutant load a waterbody can receive without violating the established water quality standards, and allocates loads of this pollutant between point and nonpoint sources. In the present research the TMDL methodology was used to demonstrate its usefulness in the management of water resources. Sceneries of soil use were simulated by mathematic modeling to define a total phosphorus concentration in the reservoir under the limit range for eutrophication established in the study (0.025–0.10 mg L⁻¹ of P). The current soil use was simulated aiming to foresee the initial condition of water quality in the waterbody. The data obtained indicate that the resulting total phosphorus concentration in the reservoir did not meet the established standard. In a second simulation with adoption of potential control measures, such as recomposed riparian areas and no-till systems, the exported total phosphorus load from the watershed decreased. With adoption of such conservation measure the simulated water quality of the reservoir improved and attained the established standard, demonstratig the applicability of the methodology.

Index terms: water quality, water resource planning, watershed management.

INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento populacional provoca um aumento na demanda de água para abastecimento, ao mesmo tempo que se intensificam os despejos de esgotos urbanos e industriais em rios e lagos. No meio rural, o desenvolvimento das atividades agropecuárias também causa a degradação dos recursos hídricos, quer seja pelo desmatamento, pelo uso inadequado da água na irrigação, quer pelo carreamento, por meio da erosão, de agrotóxicos e de fertilizantes até os corpos d'água. Tais formas de poluição pontuais e difusas acarretam a degradação de ecossistemas, além de prejuízos à qualidade das águas e ao abastecimento público.

Para reverter esta situação, é preciso adotar um modelo de gestão de recursos hídricos que promova um desenvolvimento sustentável, aliando o crescimento econômico à preservação ambiental. No Brasil, um passo foi dado neste sentido com a aprovação da Lei Federal nº 9433 em 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Para implementar esta lei, em bacia hidrográfica, torna-se necessário o uso de ferramentas de planejamento que possibilitem incorporar os fatores que afetam a qualidade da água, os quais são diversos e possuem complexas interações entre si. Mundialmente, são utilizadas diferentes

combinações dessas ferramentas visando à adoção de um processo de gestão dos recursos hídricos mais adequado às características de cada país (Nachtnebel, 2000; Pio & Henriques, 2000; Almeida, 2001).

Dentre os diversos métodos existentes, o TMDL (total maximum daily load) - carga total máxima diária é o processo de planejamento de recursos hídricos implementado nos Estados Unidos. Este processo desenvolvido pela EPA (United States Environmental Protection Agency) determina a quantidade máxima de cargas de um poluente que um corpo d'água pode receber sem violar os padrões estabelecidos de qualidade da água e aloca cargas deste poluente entre fontes pontuais e difusas (USEPA, 1991; USEPA, 1997). Acima de 40 % dos corpos d'água americanos não se encontram dentro das normas de qualidade da água fixadas por estados e territórios (Karkoski & Young, 2000). Por este motivo, foram requeridos, judicialmente, aproximadamente 40.000 novos TMDLs, dos quais cerca de 45 % incluem fontes difusas. O escoamento superficial agrícola é atualmente a principal fonte de poluição de corpos d'água que não satisfazem normas de qualidade das águas americanas, afetando 70 % destas águas degradadas (USEPA, 1992).

Com o objetivo de avaliar alternativas de gestão ambiental, o TMDL simula diferentes cenários de alocações de cargas, principalmente nos casos em que o corpo d'água recebe cargas de múltiplas fontes. Para

tanto, são utilizados modelos matemáticos para quantificar as cargas exportadas das bacias hidrográficas, como também modelos matemáticos de qualidade da água.

Um importante componente das fontes de poluição difusas em bacias hidrográficas agrícolas é o P no escoamento superficial. Este poluente pode acelerar o processo de eutrofização, que consiste no enriquecimento de corpos d'água por nutrientes. Para controlar este processo, é necessária uma melhoria das práticas de manejo de solo (Withers et al., 2000). Em corpos d'água utilizados para abastecimento público, a eutrofização provoca complicações, causando odor e sabor desagradáveis à água, entupimento de filtros de estações de tratamento, podendo, ainda, causar problemas à saúde da população (Branco, 1991).

O estudo teve por objetivo geral demonstrar o uso do método TMDL como forma de prever a evolução da qualidade da água em uma bacia hidrográfica, bem como determinar ações adequadas de conservação, monitoramento e recuperação.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio Piraquara, localizada em área rural da Região Metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná, cuja principal atividade econômica é a agropecuária, com predomínio do cultivo de milho e de pastagem. No local, aplicou-se o processo TMDL para o nutriente P, visando evitar a eutrofização do futuro reservatório de abastecimento público Piraquara II.

Um TMDL quantitativamente é:

$$\text{TMDL} = \text{WLA} + \text{LA} + \text{MOS} \quad (1)$$

em que WLA (wasteload allocation) – alocações de águas residuárias: para fontes pontuais; LA (load allocation) – alocações de carga: para fontes difusas; MOS – margem de segurança: que leva em conta a incerteza científica que pode ser causada por dados de qualidade insuficientes ou pela falta de conhecimento sobre o corpo d'água receptor e sobre os efeitos da poluição.

O processo TMDL é desenvolvido em cinco etapas, nas quais o monitoramento está sempre presente (USEPA, 1991): primeira etapa – identificação e listagem dos corpos d'água que requerem TMDL; segunda etapa – escolha de objetivos e classificação por prioridade; terceira etapa – desenvolvimento do TMDL; quarta etapa – implementação do TMDL, por ações de controle; quinta etapa – avaliação das ações de controle.

O estudo foi realizado em uma área rural de aproximadamente 5.800 ha, correspondente à área de drenagem de contribuição do futuro reservatório Piraquara II (Quadro 1).

Quadro 1. Características do reservatório Piraquara II

Característica	Piraquara II
Situação	em construção
Cota de Inundação (m)	891
Área de Drenagem (km ²)	58
Área do Reservatório (km ²)	5,64
Volume (m ³)	20,812 x 10 ⁶
Vazão Regularizada (m ³ s ⁻¹)	1,14
Tempo de Residência Médio (dia)	75
Profundidade Média do Reservatório (m)	3,28

Fonte: Consórcio Paranasan (2000); Comec (2002).

Selecionou-se o P como propriedade de qualidade da água para a determinação do TMDL, uma vez que o nutriente é limitante para a ocorrência de eutrofização para os corpos d'água da região, que apresentam uma relação N/P > 10 de acordo com dados fornecidos pelo IAP (Instituto Ambiental do Paraná). Segundo Horne & Goldman (1994), numa relação de N/P > 10, considera-se que o P limita o crescimento do fitoplâncton. Na área do estudo, não existem fontes pontuais de poluição que chegam ao reservatório Piraquara II. Por se tratar de uma área agrícola, predomina a exportação de cargas de P provenientes de fontes de poluição difusas, como o transporte até os corpos d'água de sedimentos, fertilizantes, resíduos vegetais e dejetos de animais.

Adotou-se a faixa de 0,025 a 0,10 mg L⁻¹ como limite para concentração de P total (Pt) no reservatório Piraquara II para ocorrência de eutrofização (Von Sperling, 1996). Realizou-se a simulação de cenários de uso do solo no transporte de P, utilizando o modelo matemático SWAT - Soil and Water Assessment Tool, desenvolvido pelo Departamento dos Estados Unidos de Agricultura (USDA) – Serviço de Pesquisas Agrícolas (ARS) de Temple, Texas (Neitsch et al., 2002).

O modelo SWAT (Neitsch et al., 2002) foi alimentado com informações sobre clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica do reservatório Piraquara II. O processo físico associado ao movimento da água, movimento do sedimento, crescimento da cultura, ciclo de nutrientes, cargas e concentrações de N e P foi diretamente modelado usando esses dados de entrada.

Na simulação de uso atual do solo (cenário A), utilizando o SWAT (Neitsch et al., 2002), determinaram-se as condições de P a montante, isto é, a entrada com dados da carga de P proveniente do reservatório Piraquara I, bem como adotou-se para o uso agrícola, como prática de manejo, o sistema de cultivo convencional para a cultura do milho com uma aração, duas gradagens e uma adubação orgânica com

50 kg ha⁻¹ de esterco bovino no mês de agosto; uma adubação química com 350 kg ha⁻¹ de adubo formulação 4-14-8 e plantio no mês de setembro.

Outras informações requeridas foram obtidas por meio de mapas e dados compilados por Jacobs (2002). A edição dos mapas foi feita pelo sistema de informações geográficas *ArcView*, versão 3.2, com o módulo *Spatial Analyst* 1.1. A partir dos mapas, a geração dos dados de entrada do modelo foi feita por meio de uma interface do *ArcView*, na forma da extensão *Auswat*.

A separação em sub-bacias foi feita pelo programa, a partir da especificação arbitrária do tamanho mínimo da sub-bacia de 50 ha, resultando na divisão de 27 sub-bacias.

Atributos das classes de solos requeridos pelo SWAT foram retirados de Embrapa (1984) e, a partir destes dados, a retenção de água e a condutividade hidráulica saturada dos solos foram calculadas pelo programa *Splintex*.

O mapa de uso de solo, obtido de Consórcio Paranapanã (2000), foi transformado no formato malha do *ArcView* e teve sua tipologia original alterada para tipologia padrão do SWAT (Quadro 2). Os parâmetros das tipologias do SWAT (Neitsch et al., 2002), que governam os efeitos sobre a hidrologia de superfície e a erosão, foram os padrões do modelo.

Os dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima, de duas estações climatológicas: Pinhais e Mananciais da Serra (Paraná), para o período do teste, foram obtidos dos arquivos do SIMEPAR. Estes dados foram submetidos ao programa *Wxparm*⁽⁴⁾ para a determinação de parâmetros estatísticos mensais, necessários para preencher dados faltantes da série histórica (Roloff & Szczypior, 2003).

Para calibração, foi realizada a comparação entre dados estimados pelo modelo com os dados efetivamente medidos. Para o SWAT, recomenda-se priorizar a validação de propriedades hidrológicas antes de propriedades de qualidade da água, uma vez que a hidrologia de superfície é o grande fenômeno controlador no modelo (Neitsch et al., 2002). Deste modo, compararam-se os dados de vazão, em termos de médias anuais de 1998 a 2002, estimados pelo modelo, com aqueles medidos na estação 65004995 da SUDERHSA, localizada próxima à foz do rio Piraquara. Realizou-se, então, a calibração da propriedade vazão que resultou em uma correlação entre os dados medidos e estimados de 0,82.

Não foi possível a calibração por meio dos dados de concentração de P no corpo d'água pela falta de dados de vazão e pela falta de uma frequência mensal na série histórica de dados de qualidade da água, que

foram obtidos por amostragem com tempos longos (meses) entre amostragens. Tais condições de isolamento temporal dificilmente são reproduzidas por um modelo de longo período como o SWAT (Neitsch et al., 2002).

Aplicou-se, então, o SWAT, para um período de 10 anos, 1998 a 2008. Considerou-se que o reservatório Piraquara II entrou em operação no ano de 2004, e a análise dos resultados foi efetuada para o ano de 2006, de modo a descartar a influência do enchimento do reservatório na concentração de P e por este ano apresentar uma precipitação anual de 1.390 mm, valor próximo à média anual de 1.376 mm, registrada na estação de Pinhais para o período de 1970 a 2002.

Avaliou-se, então, o atendimento do padrão de concentração de P total (mg L⁻¹) na entrada do reservatório Piraquara II, considerando como P total (Pt) a soma do P orgânico e do P mineral. Analisaram-se também a exportação da carga anual de Pt da bacia para cada uso do solo (em kg ha⁻¹ ano⁻¹ e em kg ano⁻¹) e a exportação mensal da carga de Pt, considerando como Pt a soma de P orgânico, P solúvel e P ligado ao sedimento. O não-atendimento do padrão acarretou uma nova simulação (cenário A1) em que foram adotadas ações de controle para redução da concentração de Pt no reservatório, na qual a carga proveniente do reservatório Piraquara I, de 9,46 kg dia⁻¹ de Pt, foi considerada como fonte de poluição incontrolável. Finalmente, o TMDL foi dado pela carga necessária para alcançar o padrão estabelecido.

O presente estudo não teve por finalidade avaliar a eficiência do modelo SWAT, tampouco desenvolvê-lo em detalhe, mas, sim, mostrar sua potencialidade, utilizando-o como uma ferramenta para aplicação do método TMDL. A aplicação de todas as etapas do processo TMDL não foi possível, visto que algumas das etapas, como a de identificação de corpos d'água de qualidade limitada, exigiriam a consolidação do processo em nível regional, enquanto outras, como a implementação e avaliação das ações de controle, exigiriam um período de estudo mais longo e investimento de recursos financeiros não-compatíveis com o trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicação do processo TMDL

Na aplicação do processo TMDL para a bacia hidrográfica do reservatório Piraquara II, em virtude da pouca disponibilidade de dados, consideraram-se os principais fatores que ocasionariam o problema de eutrofização, chegando, portanto, a resultados indicativos de melhoria das condições de qualidade da água do corpo d'água a partir de mudanças do uso do solo na bacia hidrográfica.

⁽⁴⁾ www.brc.tamus.edu/epic/index.html

Quadro 2. Percentagens das áreas ocupadas pelos diferentes usos do solo da bacia hidrográfica do reservatório Piraquara II

Tipologia original	Tipologia utilizada pelo SWAT	Área ocupada
		%
Floresta	Floresta perenifolia	33,4
Campo seco/pastagem	Campo com vegetação rasteira	24,3
Agricultura	Agricultura em linha	21,6
Várzea/campo de inundação	Várzeas sem mata	9,2
Reflorestamento	Povoamento de pinus	1,5
Lagoas naturais e artificiais	Áreas inundadas	10,0

Primeira Etapa - Identificação do corpo d'água que requer TMDL

A legislação americana por meio do Clean Water Act exige que estados e territórios submetam, para aprovação pela EPA, suas listas de corpos d'água degradados que não satisfazem as normas de qualidade da água, mesmo depois de instalados os níveis mínimos de tecnologia de controle de poluição para fontes pontuais. Também são incluídas nestas listas as águas que se encontram dentro dos padrões de qualidade, mas estão ameaçadas por poluentes ou aquelas com declínio de qualidade ou perda de habitat. Nestas listas, são identificados os poluentes que estão causando a degradação a cada corpo d'água, assim como as causas e as fontes de degradação (USEPA, 1991; USEPA, 1997).

A identificação do reservatório Piraquara II, a ser localizado na Região Metropolitana de Curitiba, como objeto para aplicação do processo TMDL deveu-se à eutrofização em reservatórios destinados ao abastecimento público da região, como os do Passaúna e do Iraí em 2001.

De acordo com dados de literatura, juntamente com dados fornecidos pelo IAP, o P é o nutriente limitante para ocorrência de eutrofização na região; além disso, os valores de Pt nos corpos d'água da bacia do rio Piraquara excedem 0,025 mg L⁻¹ (limite para concentração de P de acordo com a Resolução CONAMA 20/86), principalmente em períodos chuvosos.

A grande variabilidade nas concentrações de Pt no rio Piraquara, verificada pelo IAP na estação de monitoramento de água A14, de várias ordens de magnitude (de 0,002 a 0,183 mg L⁻¹, no período de maio de 1991 a outubro de 2002), é uma das características de fontes de poluição difusas, como é o caso da agricultura (Von Sperling, 1996). A maioria dos impactos severos causados por este tipo de fonte de poluição acontece após eventos de chuva, trazendo, como consequência, concentrações do poluente imprevisíveis e extremamente variáveis (USEPA, 1997).

Considerando as altas concentrações de Pt nos corpos d'água da bacia, verificadas no monitoramento periódico realizado pelo IAP e confirmadas por Marques (2000), identificou-se que o futuro reservatório Piraquara II será um corpo d'água ameaçado pela introdução de P, aqui considerada como causa da degradação, proveniente da fonte de degradação: atividade agropecuária.

Segunda Etapa - Escolha de objetivos e classificação por prioridade

Depois de listados, os corpos d'água são classificados por prioridade de quais necessitam TMDL, conforme a severidade de poluição e os usos a serem feitos da água (USEPA, 1991; USEPA, 1997).

Considerou-se como prioridade a realização do TMDL no reservatório Piraquara II, por tratar-se de um corpo d'água de fundamental importância para o futuro abastecimento público da Região Metropolitana de Curitiba (SANEPAR, 1992).

Estabeleceu-se que, quando os valores de concentração de Pt no reservatório Piraquara II estivessem entre 0,025 e 0,10 mg L⁻¹ haveria eutrofização. A adoção de uma faixa de valores e não de um único valor padrão de concentração de Pt para ocorrência de eutrofização deveu-se à grande amplitude de valores de concentração propostos por diversos autores e à difícil generalização de dados de um corpo d'água para outro (Von Sperling, 1996).

Terceira Etapa - Desenvolvimento do TMDL

Por meio de modelagem matemática, realizou-se a análise preditiva (prognóstico) da poluição no corpo d'água e a determinação da carga de poluição total permissível (USEPA, 1991).

Como resultado da aplicação do modelo SWAT (Neitsch et al., 2002) em simulação do cenário A para o ano 2006, obteve-se uma concentração média anual de Pt na entrada do reservatório Piraquara II de 0,039 mg L⁻¹, e, em 75 % dos meses do ano, a concentração mensal no reservatório esteve entre a

faixa limite estabelecida para ocorrência de eutrofização. As condições críticas (Figura 1) ocorreram nos meses mais chuvosos, maio e novembro, nos quais as concentrações chegaram, respectivamente, a 0,064 e 0,073 mg L⁻¹. Em maio e novembro, com precipitações de 183 e 170 mm, respectivamente, também ocorreram as maiores exportações de carga de Pt, respectivamente, de 0,156 e 0,223 kg ha⁻¹ (Figura 2).

O maior aumento de exportação de carga no mês de novembro em relação a maio explica-se pelo fato de novembro ter sido considerado como período de cultivo de milho, estando as terras com maiores quantidades de adubos, químicos e orgânicos, que continham P, os quais são carregados com a água da chuva em períodos de alta precipitação. Em maio, apesar da alta precipitação, foi menor a quantidade de P no solo, disponível para ser carregado, por ser este um período no qual a terra não é cultivada, tampouco adubada. Segundo Haygarth & Sharpley (2000), o P é removido do solo principalmente pela erosão, junto às partículas de solo, dependendo da quantidade de material sólido no escoamento superficial, da intensidade da chuva e da quantidade e energia da água de escoamento superficial, aliada a outros fatores (Ryden et al., 1973).

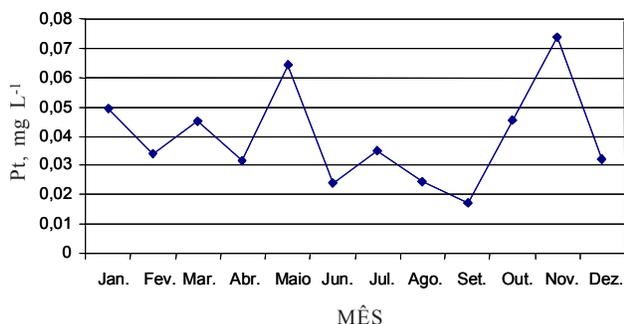


Figura 1. Resultado da simulação matemática do cenário A, no ano de 2006, para a concentração mensal de P total (Pt) no reservatório Piraquara II.

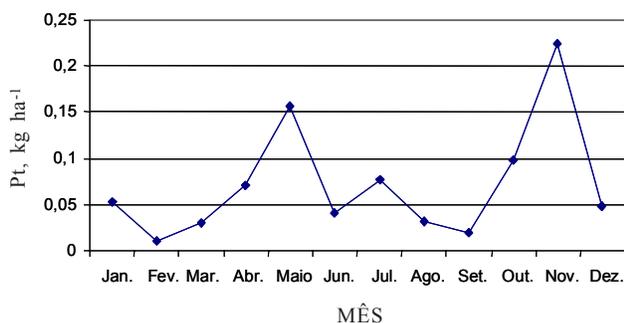


Figura 2. Exportação de carga de P total (Pt) na área de drenagem de contribuição ao reservatório Piraquara II.

A carga de Pt exportada da bacia foi de 0,859 kg ha⁻¹, estando acima do nível permissível de 0,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e abaixo da carga perigosa de 1,3 kg ha⁻¹ ano⁻¹, valores considerados por Vollenweider (1968) para entradas de Pt em lagos de profundidade média de 5 m, no qual se enquadra o reservatório Piraquara II, com vistas em manter a produtividade em níveis considerados não-prejudiciais à qualidade da água.

A maior exportação de carga foi na área de agricultura de 3,466 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de Pt (Quadro 4). Esta carga pode ser considerada alta de acordo com o valor de 0,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para áreas agrícolas, valor sugerido por Von Sperling (1985), após compilação de diversos dados. No entanto, a amplitude de valores obtidos por diferentes autores é grande, variando de 0,691 a 7,8 kg ha⁻¹ (Begston et al., 1988; Chambers et al., 2000).

Para confirmação da carga que é realmente exportada da bacia, segundo o uso do solo, seria necessária uma medição em campo. Esta medição permitiria verificar se os valores obtidos estão próximos dos valores reais.

Quarta etapa - Implementação do TMDL, por ações de controle

Os controles de fontes pontuais e difusas devem ser executados para encontrar, respectivamente, as alocações de esgoto (WLA) e as alocações de cargas (LA) estabelecidas pelo TMDL. No caso do estudo, para o controle de fontes difusas, uma ferramenta útil para redução de cargas de poluentes é a implantação das BMPs (Best Management Practices) - Melhores Práticas de Manejo (USEPA, 1991; USEPA, 1997). As BMPs são métodos e práticas desenvolvidos com a finalidade de prevenir e, ou, reduzir a poluição por fontes difusas, as quais prevêm principalmente a redução do volume total escoado, método semelhante ao adotado no controle de erosão (Dalcanele & Porto, 1999).

As contribuições de P ao corpo d'água foram provenientes da agricultura e como medida de controle para reduzir a erosão e o transporte de P até o reservatório adotaram-se as BMPs: plantio direto e plantio de mata ciliar; visando encontrar as alocações de cargas (LA).

Adotou-se uma faixa de mata ciliar ao redor do reservatório com largura de 100 m, seguindo a Resolução CONAMA 004/85. Esta área impede ou dificulta o transporte de sedimentos para os canais de drenagem, contribuindo com a manutenção da qualidade da água.

Uma redução de 27 a 97 % na carga total de P proveniente do escoamento superficial foi obtida por Uusi-Kamppa et al. (2000) em experimentos de campo com zonas tampão usadas para remover o P proveniente do escoamento superficial agrícola na Finlândia, Noruega, Suécia e Dinamarca. A outra ação de controle, o plantio direto, gera notáveis efeitos na redução das perdas por erosão (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

A redução da carga de P exportada da bacia foi obtida por meio da implementação na simulação matemática das ações de controle aqui descritas, cenário A1. A concentração média anual de Pt no reservatório Piraquara II passou de 0,039 (cenário A) para 0,021 mg L⁻¹ no cenário A1 (Figura 3). A concentração mensal de Pt no reservatório em 16,6 % dos meses do ano de 2006 esteve entre a faixa limite para ocorrência de eutrofização. As maiores concentrações foram obtidas nos meses de maio e novembro, respectivamente, de 0,037 e 0,055 mg L⁻¹. Levando em conta que somente em dois meses do ano a concentração excedeu o limite adotado como mínimo (0,025 mg L⁻¹), além da dificuldade de adoção de faixas rígidas (Von Sperling, 1996), considerou-se que os valores obtidos satisfazem o padrão estabelecido. A alocação de cargas (LA) e o TMDL ficaram estabelecidos como mostra o quadro 3.

O plantio direto proporcionou uma redução de carga de Pt exportada da área agrícola de 2.904 kg ano⁻¹. A carga exportada da área de reflorestamento permaneceu praticamente constante, enquanto, nas áreas ocupadas por várzea e campo/pastagem, houve uma redução na carga exportada em virtude da substituição de partes destas áreas, localizadas na faixa de 100 m ao redor do reservatório, pela floresta (mata ciliar), uso este que gerou uma menor exportação de carga de P (Quadro 4). O pequeno aumento na carga exportada da área ocupada pela floresta deveu-se ao aumento da área com o uso de floresta (mata ciliar), aliado ao fato de a floresta propiciar menor exportação de P.

Com a adoção das BMPs, a carga anual de Pt exportada da área passou de 0,859 para 0,325 kg ha⁻¹, representando uma redução de 62,2 %. O plantio direto proporcionou uma redução de 59,9 % na exportação da carga de Pt da área de agricultura. Em relação à exportação mensal de carga de Pt, houve uma diminuição média mensal de 73,4 %. A meta de carga do TMDL para o Pt obtida para o uso atual do solo foi de 1.822 kg ha⁻¹, sendo necessário para obtê-la uma redução de 2.987 kg ha⁻¹ na carga de Pt.

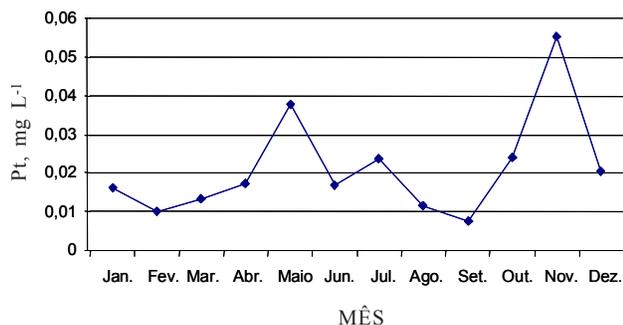


Figura 3. Resultado da simulação matemática do cenário A1, no ano de 2006, para a concentração mensal de P total (Pt) no reservatório Piraquara II.

Quadro 3. Resultado da simulação matemática no ano de 2006 para as alocações de carga de P nos usos do solo, antes (Cenário A) e depois da adoção das medidas de controle (Cenário A1)

Uso do solo	Exportação/alocação de carga de P (LA)	
	Cenário A	Cenário A1
	— kg ano ⁻¹ —	
Agricultura	4.617,72	1.714,1
Várzea	89,37	28,2
Campo/Pastagem	86,87	64,3
Floresta	14,00	14,5
Reflorestamento	1,27	1,1
LA TOTAL	4.809,23	1.822,2
Efluente industrial	-	-
Efluente urbano	-	-
WLA TOTAL	-	-
TMDL	-	1.822,2

Quadro 4. Resultado da simulação matemática no ano de 2006 para a carga de P total (Pt) exportada em cada uso do solo da bacia hidrográfica do reservatório Piraquara II

Uso do solo	Carga de fósforo total	
	Cenário A	Cenário A1
	— kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ —	
Agricultura	3,466	1,494
Várzea	0,159	0,104
Campo/Pastagem	0,058	0,052
Floresta	0,006	0,006
Reflorestamento	0,014	0,014

Quinta Etapa - Avaliação das ações de controle

A última etapa do processo TMDL consiste na implementação de um programa de monitoramento para verificar se as melhorias na qualidade da água estão ocorrendo conforme o esperado e se novas medidas de controle devem ser adotadas. Esta etapa não foi realizada neste estudo.

Os dados do monitoramento são usados para avaliar a efetividade da implementação de BMPs e para analisar se a realização da meta definida de concentração de Pt no reservatório, de 0,025 a 0,10 mg L⁻¹, resulta realmente na ausência de eutrofização.

Segundo USEPA (1991) e USEPA (1997), o corpo d'água, se alcançar os padrões de qualidade, pode ser removido da lista de corpos d'água que necessitam de TMDLs. Em caso contrário, as alocações de carga (LA) e de cargas de águas residuárias (WLA) devem ser modificadas, com base na coleta de dados e de informações adicionais, como parte da rotina das atividades de monitoramento e de avaliação do corpo d'água.

Assim, seguindo todas as etapas do processo TMDL, é possível prever quais devem ser as medidas de controle mais adequadas para obter melhorias nas condições de qualidade da água de um corpo d'água, facilitando o planejamento de ações de uso e manejo de bacias hidrográficas.

CONCLUSÕES

1. Na demonstração do processo TMDL para a bacia hidrográfica do futuro reservatório Piraquara II, os principais fatores que contribuíram para eutrofização do corpo d'água no uso atual do solo foram: a carga de P exportada do uso do solo agrícola e a pequena profundidade do corpo d'água. Assim, o reservatório pode ser considerado um corpo d'água com grande potencial de eutrofização, para a faixa de concentração de P total adotada (0,025 a 0,10 mg L⁻¹).

2. A adoção de apenas duas medidas de controle de exportação de carga de P da bacia, o plantio direto e a recomposição da mata ciliar, foram suficientes para reduzir a quantidade de P que chegava ao reservatório. Dentre as duas medidas, a implementação de mata ciliar com floresta foi o uso do solo que exportou a menor carga de P da bacia até o reservatório, graças à capacidade de filtragem de nutrientes.

AGRADECIMENTOS

À professora Beatriz Monte Serrat, pelo auxílio na adequação do presente artigo. Ao engenheiro civil Enéas Machado, ao agrônomo Luiz Mariano Szczypior, aos professores Gláucio Roloff, Antônio Carlos Vargas Motta e Nerilde Favaretto, ao amigo Maurício Capela, ao profissional Gilmar Cravisso; ao IAP, SUDERHSA, SIMEPAR, PARANASAN e EMATER, pelas informações fornecidas. Ao CNPq, pelo incentivo financeiro.

LITERATURA CITADA

ALMEIDA, A.B. Metodologia de planejamento de recursos hídricos em Portugal, aplicação à região de Algarve. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9.; Sergipe, 2001. Relação de artigos. Sergipe, ABRH, 2001. 1. CD-ROM

BEGSTON, R.L.; CARTER, C. E. ; MORRIS, M.F. & BATKIEWICZ, S.A. The influence of subsurface drainage practices on nitrogen and phosphorus losses in a warm, humid climate. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 31:729-733, 1988.

BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo, Ícone, 1990. 355p.

BRANCO, S.M. A água e o homem. In: PORTO, R.L.L.; BRANCO, S.M.; CLEARY, R.W.; COIMBRA, R.M.; EIGER, S.; LUCA, S.J.; NOGUEIRA, V.P.Q & PORTO, M.F.A., orgs. *Hidrologia ambiental*. São Paulo, ABRH, 1991. p.3-26.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 004, de 1985. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reso.html> Acesso em: 30 ago. 2002.

BRASIL. Resolução CONAMA n. 20, de 18 de junho de 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reso.html> Acesso em: 30 ago. 2002.

BRASIL. Lei n. 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Conselho Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.cnrh-srh.gov.br/legisla/index.htm> Acesso em 30 ago. 2002.

CHAMBERS, B.; GARWOOD, T.W.G. & UNWIN, R.J. Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England and Wales. *J. Environ. Qual.*, 29:145-150, 2000.

COMEC - Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba. Zoneamento ecológico-econômico da APA do Piraquara. Curitiba, 2002.

CONSÓRCIO PARANASAN - ENGEVIX-CKC-ETC-BVI-EETEP-ESTEIO-RDR. Estudo de impacto ambiental - Barragem Piraquara II. Curitiba, Projeto de Saneamento Ambiental do Paraná – PARANASAN/UGP PARANASAN –SANEPAR, 2000.3v.

DALCANALE, F. & PORTO, M. Métodos de controle de cargas difusas em bacias rurais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13.; Belo Horizonte, 1999. Relação de trabalhos. Belo Horizonte, ABRH, 1999 1 CD-ROM

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Paraná. EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR. Londrina, 1984. 791p. 2 Tomo (Boletim de Pesquisa, 27)

HAYGARTH, P.M. & SHARPLEY, A.N. Terminology for phosphorus transfer. *J. Environ. Qual.*, 29:10-15, 2000.

HORNE, A.J. & GOLDMAN, C.R. *Limnology*. 2.ed. Singapore, McGraw Hill International, 1994. 576p. (Biological Science Series)

JACOBS, G.A. Dinâmica de uso e ocupação dos mananciais na Região Metropolitana de Curitiba-PR. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002. 255p. (Tese de Doutorado)

- KARKOSKI, J. & YOUNG, T.F. Green evolution: Are economic incentives the next step in nonpoint source pollution control? *Water Policy*, Oakland, 2:151-173, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/watpol>> Acesso em: 09 mar. 2001.
- MARQUES, P.H.C. Estudo limnológico do rio Piraquara (Piraquara - Pr): Variação espacial e temporal das características físicas e químicas e ordenação espacial da bacia hidrográfica. São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2000. 100p. (Tese de Mestrado)
- NACHTNEBEL, H. The Danube river basin environmental programme: Plans and actions for a basin wide approach. *Water Policy*, Oakland, 2:113-129, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/watpol>> Acesso em: 09 mar. 2001.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. & KING, K.W. Soil and water assessment tool - theoretical documentation, version 2000. Temple, Grassland, Soil and Eater Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station. 2002. 212p.
- PIO, S. & HENRIQUES, A.G. O estado ecológico como critério para a gestão sustentável de águas de superfície. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 5., 2000, Lisboa, Relação de trabalhos. Lisboa, Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2000. 1. CD-ROM
- ROLOFF, G. & SZCZYPIOR, L.M.B. A modelagem como ferramenta para o planejamento e gerenciamento de mananciais. Projeto PADCT - Mananciais: Relatório Componente. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2003.
- RYDEN, J.C.; SYERS, J.K. & HARRIS, R.F. Phosphorus in runoff and streams. *Adv. Agron.*, 25:1-45, 1973.
- COMPANIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR. Plano diretor do sistema de água de Curitiba e Região Metropolitana. Curitiba, Geotécnica-Proensi-Osm-Serenco - Consult., 1992.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Guidance for water quality-based decisions: The TMDL process. Washington. Office of Water, EPA 440/4-91-001. Apr. 1991. Disponível em: <<http://www.epa.gov/OWOW/tmdl/decisions/index.html>> Acesso em: 10 out. 2001.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Planning and evaluation: Benefits and feasibility of effluent trading between point sources: An analysis in support of clean water act reauthorization. Washington, Office of Water and Office Police, 1992.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Technical guidance manual for developing Total Maximum Daily Loads. Book 2: Streams and Rivers. Biochemical Oxygen Demand/Dissolved Oxygen and Nutrients Eutrophication. Washington, Office of Water, EPA 823/B-97-002. Mar. 1997. Part 1 Disponível em: <<http://www.epa.gov/waterscience/tmdl/guidance.pdf>> Acesso em: 31 out. 2001.
- UUSI-KAMPA, J.; BRASKERUD, B.; JANSSON, H.; SYVERSEN, N. & UUSITALO, R. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 29:151-158, 2000.
- VOLLENWEIDER, R.A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factor in eutrophication. Paris, OECD Report n. DAS/CSI/67, 1968.
- VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. v.1. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2.ed. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.
- VON SPERLING, M. Utilização de gráficos para a avaliação preliminar do aporte de fósforo a uma represa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 13.; Maceió. SEECLA, 1985.
- WITHERS, P.J.A.; DAVIDSON, I.A. & FOY, R.H. Prospects for controlling diffuse phosphorus loss to water. *J. Environ. Qual.*, 29:167-175, 2000.