

Aplicação de geotecnologias na modelagem do potencial poluidor das sub-bacias de contribuição para o reservatório de Barra Bonita – SP relacionado à qualidade da água

Rachel Bardy Prado ¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo ²

¹ Embrapa Solos - CNPS
Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico- Rio de Janeiro - RJ, Brasil
rachel@cnps.embrapa.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
evlyn@ltd.inpe.br

Abstract. Water quality deterioration is a common problem related to pollutants inputs. The situation becomes worse in the reservoirs due to multiple water uses between other problems. Barra Bonita reservoir was selected for study because it is located in an overpopulated area of the São Paulo State where there are many point and nonpoint water pollution sources. The data used to carry out the study included physical features (pedology, geomorphology, geology, drainage and precipitation) provided by several public agencies and land use/land cover data derived from Landsat ETM satellite (2002). After that, the geotechnologies (GIS, remote sensing, spatial and multicriterion data analysis) were applied to diagnose physical features, to map land use/land cover basin and to model potential pollution instances for each sub-basin related to water quality. Finally, the water resources management is paramount in order to improve the water quality in this basin and is expected that information and methodologies applied in this research can be used to support this sustainable process.

Palavras-chave: geotechnologies, water quality, nonpoint pollution, multicriterion analysis, water resources management, geotecnologias, qualidade da água, poluição difusa, análise multicritério, gestão de recursos hídricos.

1. Introdução

As questões relacionadas à degradação da qualidade da água têm sido bastante discutidas pela sociedade nos seus diversos âmbitos. Vários são os fatores que levam à deterioração da água, podendo ser classificados em fontes pontuais e difusas. As fontes pontuais se caracterizam, essencialmente, pelos efluentes domésticos e industriais, já as difusas são caracterizadas pelos resíduos provindos da agricultura (fertilizantes, herbicidas, inseticidas, fungicidas, entre outros). Este tipo de poluição pode ser intensificado devido à interferência antrópica no ambiente como a irrigação, a compactação do solo, a mecanização, o desflorestamento, a ausência de práticas conservacionistas do solo que provocam processos erosivos, além da interferência das características naturais da própria bacia hidrográfica como a geologia, a geomorfologia, a declividade do terreno, a pedologia, o formato da bacia, as características da drenagem, o regime de chuvas entre outros.

Para um planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos tomando-se como referência a bacia hidrográfica, é preciso que as áreas com maior potencial poluidor sejam identificadas a fim de que a intervenção possa ocorrer de forma mais direcionada. Neste sentido, para melhor obtenção das informações a respeito das características antrópicas e fisiográficas de uma determinada bacia, torna-se necessária a utilização de geotecnologias como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sensoriamento remoto, análise espacial e sistemas de suporte à decisão.

Para Kuhnle *et al.*(1996) o conhecimento dos efeitos da variação do uso da terra sobre o movimento de sedimentos e água através da bacia hidrográfica é muito importante para a tomada de decisões sobre o manejo adequado das terras. Neste sentido, a modelagem

matemática tem sido utilizada. A principal vantagem de sua aplicação reside na possibilidade do estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada a seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é muitas ordens de magnitude menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância na medida em que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica de grandes extensões), além dos custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo (Pessoa *et al.*, 1997).

Nesse contexto, Machado *et al.* (2003) realizaram um trabalho simulando cenários alternativos de uso e ocupação da terra na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (Piracicaba, SP), comparando-os quanto à sua produção de sedimentos com o cenário de uso atual, para o biênio 1999/2000. As simulações foram realizadas por meio da integração do modelo matemático *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e o SIG ArcView da ESRI. Os mesmos autores concluíram que os resultados evidenciaram a necessidade de se tratar a paisagem em bacias hidrográficas de uma forma global, identificando as "áreas ambientalmente sensíveis", onde são necessárias práticas de controle dos processos erosivos ou mudanças de uso da terra, e não somente a proteção dispensada aos cursos d'água por meio da mata ciliar.

No presente trabalho, técnicas de sensoriamento remoto foram aplicadas na obtenção do uso e cobertura da terra da bacia de contribuição para o reservatório de Barra Bonita – SP em 2002, técnicas de geoestatística possibilitaram a espacialização do coeficiente de variação de pluviosidade para toda a bacia, ferramentas de SIG e análise multicritério permitiram a obtenção dos dados fisiográficos, bem como a ponderação e integração destes com as informações do uso e cobertura da terra. Desta forma, foi possível identificar as áreas prioritárias para intervenção, sendo suspeitas de possuírem um maior potencial poluidor da água.

O reservatório de Barra Bonita foi selecionado para este estudo, pois, em reservatórios observa-se um maior reflexo da interferência humana de seu entorno na degradação da água, uma vez que os rios possuem uma capacidade natural de depuração ao longo do seu curso, capacidade esta que é reduzida com sua barragem para a formação do reservatório. Com a construção dos reservatórios, ocorre também um aumento da capacidade de armazenamento de materiais orgânicos e inorgânicos provenientes da bacia de captação, sejam originários de fontes pontuais ou difusas, intensificando o processo de eutrofização. E ainda, Barra Bonita é um reservatório antigo e está localizado em uma região de intensas transformações nos padrões de uso e ocupação da terra, o que o torna suscetível a problemas de poluição e assoreamento acelerado, sem contar que é destinado a usos múltiplos, merecendo ser abordado com mais critério (Felicidade *et al.*, 2001).

2. Objetivo

O presente trabalho foi realizado buscando identificar o potencial poluidor das sub-bacias de contribuição para o reservatório de Barra Bonita – SP, relacionado à qualidade da água, considerando suas características antrópicas e fisiográficas, no intuito de fornecer subsídios à gestão de recursos hídricos na bacia em questão.

3. Área de estudo

A bacia hidrográfica de contribuição para o reservatório de Barra Bonita, adotada para estudo, é constituída por parte das bacias hidrográficas Piracicaba/Capivari/Jundiaí (BHPCJ) e

Tietê/Sorocaba (BHTS), ambas no Estado de São Paulo, correspondendo como um todo à aproximadamente 19.000 km². Está inserida entre as coordenadas geográficas 21° 54' 20'' e 23° 57' 26'' Sul e 46° 39' 27'' e 48° 34' 52'' Oeste. A **figura 1** mostra a localização da bacia no Estado de São Paulo e no Brasil, estando em UTM fuso 23 estendido porque foi a projeção adotada no presente trabalho.

Trata-se de uma das regiões mais populosas e desenvolvidas do interior do Estado de São Paulo, possuindo aproximadamente, cinco milhões de habitantes, representando 16% da população do mesmo Estado. Os problemas referentes à qualidade da água advindos do uso e cobertura da terra são bastante representativos da realidade de toda a extensão desta bacia.

O reservatório de Barra Bonita começou a operar em 1963, sendo formado pelo represamento dos rios Tietê e Piracicaba, contando com a participação de vários afluentes. Constitui-se no primeiro reservatório à jusante da cidade de São Paulo (aproximadamente 300 km em linha reta) a formar um complexo de barragens situadas no rio Tietê (Calijuri, 1999).

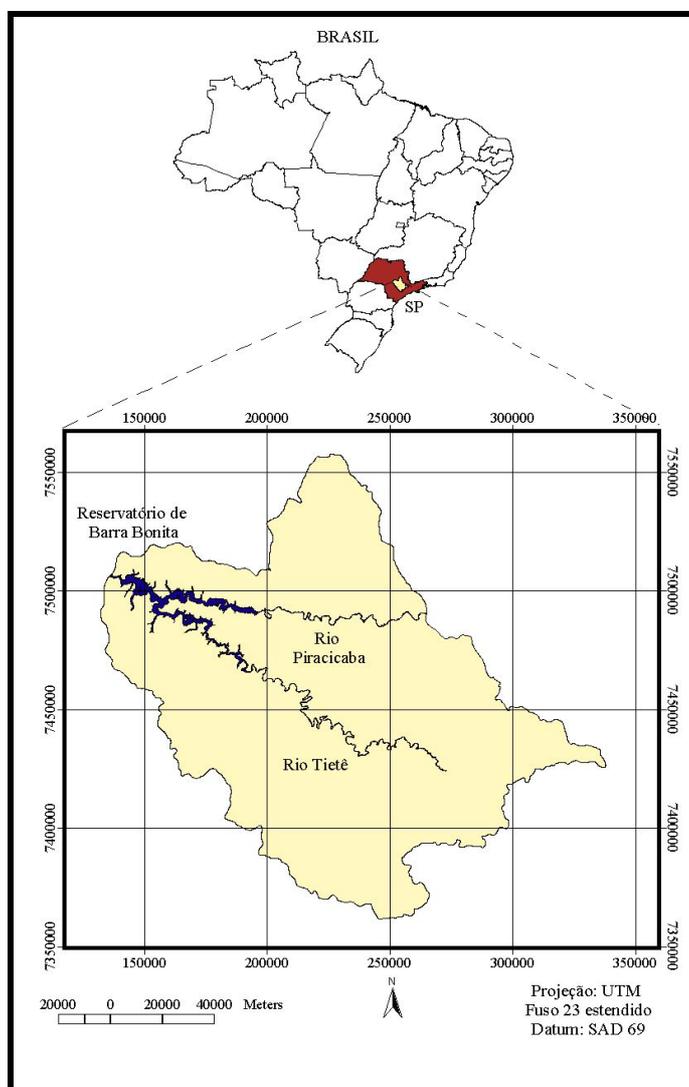


Figura 1: Localização da bacia hidrográfica de estudo e do reservatório de Barra Bonita – SP.

4. Materiais e métodos

Inicialmente foram adquiridos dados de natureza cartográfica (cartas planialtimétricas, cartas de pedologia, de geomorfologia e de geologia), orbitais (imagem multiespectral do satélite Landsat 7 de 2002) e dados pluviométricos de 75 postos de monitoramento do Departamento de Água e Esgoto (DAEE) instalados na bacia de estudo. A organização e o tratamento das diversas informações foram realizados com o auxílio de Sistema de Informação Geográfica (Spring 3.6). A escala média de trabalho adotada foi de 1:250.000.

A partir da digitalização dos dados cartográficos foram obtidos os seguintes mapas, correspondentes à bacia de estudo: mapa das sub-bacias, mapa pedológico, mapa geomorfológico, mapa geológico e mapa de drenagem. Na seqüência, obtiveram-se os mapas de densidade de drenagem (somatório dos comprimentos dos rios / área de cada sub-bacia) e distância das sub-bacias ao reservatório de Barra Bonita (módulo Mapa de Distâncias) por meio da espacialização dos resultados para cada sub-bacia (módulo Média Zonal).

Quanto aos dados pluviométricos, tendo em vista que a importância da precipitação como função de força explicativa das entradas não pontuais de poluição está muito associada à intensidade da precipitação e ao seu ritmo ao longo do ano (Guerra *et al.* 1999), considerou-se que o uso do coeficiente de variação de pluviosidade anual representaria um indicador adequado dessa variabilidade. Desta forma, calcularam-se as médias mensais para os 75 postos de monitoramento ao longo de um ano e o desvio padrão das precipitações mensais. A partir desses dados foi possível calcular o coeficiente de variação de pluviosidade (CVP) anual para cada posto de monitoramento, que neste caso é dado por:

$$CVP = \text{Desvio padrão das precipitações mensais} / \text{média anual de cada posto}$$

Os valores de CVP foram importados para o Spring onde foi aplicada a krigeagem linear (técnica de geoestatística para a interpolação dos dados, cuja vantagem é a obtenção das informações sobre a qualidade do dado gerado). A partir do mapa numérico obtido pela krigeagem, do mapa temático das sub-bacias e da aplicação do módulo Média Zonal, obteve-se o mapa do coeficiente de variação de pluviosidade da bacia.

Com relação à imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 (bandas 3, 4 e 5), o processamento constituiu-se nas seguintes fases: correção atmosférica (Chavez, 1988 e 1996), registro, equalização, mosaico de 3 cenas, segmentação (limiares de 10 e 20, respectivamente de similaridade e de área), classificação (supervisionada utilizando o classificador *Bhattacharya Distance* e o limiar de aceitação de 90%) e mapeamento. Esta fase teve como produto o mapa de uso e cobertura da terra com 11 classes, referente ao ano de 2002 para a bacia. Uma vez obtidos os mapas temáticos referentes às características fisiográficas e de uso e cobertura da terra, passou-se à modelagem dos dados.

Existem várias técnicas de análise multicritério automatizadas e implementadas nos Sistemas de Informação Geográfica. No entanto, optou-se neste trabalho, por utilizar o método mais simples que é o da Soma Ponderada, fazendo uso da ferramenta Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra (LEGAL) do Spring 3.6. Nestes métodos, os temas e suas respectivas classes são ponderados de acordo com a importância relativa para a hipótese considerada, que no presente estudo é de que as diferentes classes e temas contribuem de forma diferenciada para o transporte de poluentes ao reservatório de Barra Bonita, provocando a degradação de sua água. Para se atribuir os pesos aos temas e classes contou-se com a experiência profissional de técnicos especialistas nos diferentes temas, bem como o conhecimento prévio da área de estudo.

Desta forma, as classes obtidas para cada mapa temático bem como os temas foram organizados em cinco níveis de contribuição quanto ao potencial poluidor que afeta o

reservatório de Barra Bonita (1-Muito baixo, 2-Baixo, 3-Médio, 4-Alto e 5-Muito alto). Para tal, alguns critérios foram adotados, baseando na relação das características de cada classe e tema com o escoamento superficial e, portanto, com o transporte de poluentes ao reservatório.

Os valores obtidos, na forma de mapas numéricos para cada classe, dentro do seu respectivo tema, foram também espacializados por sub-bacia, a partir da Média Zonal. Para a aplicação da álgebra de mapas alguns cuidados devem ser tomados, um deles é que todos os mapas temáticos devem possuir uma unidade de mapeamento comum, que neste caso foi a sub-bacia. Do contrário, gera-se muita inconsistência (polígonos muito pequenos) que dificultam a apresentação dos resultados na forma de mapas, assim como interferem no cálculo de áreas.

A partir da modelagem do potencial poluidor das sub-bacias de contribuição para o reservatório de Barra Bonita – SP, relacionado à qualidade da água, aplicando-se análise multicritério, foram obtidos 4 cenários. Os Cenários 1, 2, 3 e 4 foram gerados partindo da premissa que o uso e cobertura da terra exerça maior influência no aporte de poluentes que atingem o reservatório de Barra Bonita, pois, acredita-se que a interferência antrópica esteja sendo o fator que mais tem contribuído para o processo de degradação da qualidade da água nas últimas décadas, já as características fisiográficas não se modificam de forma drástica em uma pequena escala temporal. Para simular essa hipótese procurou-se manter os pesos dos diversos temas, com exceção do uso e cobertura da terra, ao qual foram atribuídos pesos cada vez maiores (3, 4, 5 e 7). A modelagem dos Cenários encontra-se expressa pelas equações C1, C2, C3 e C4, a seguir:

$$C1 = ((T1 * P1) + (T2 * P3) + (T3 * P2) + (T4 * P2) + (T5 * P2) + (T6 * P2) + (T7 * P3))$$

$$C2 = ((T1 * P1) + (T2 * P3) + (T3 * P2) + (T4 * P2) + (T5 * P2) + (T6 * P2) + (T7 * P4))$$

$$C3 = ((T1 * P1) + (T2 * P3) + (T3 * P2) + (T4 * P2) + (T5 * P2) + (T6 * P2) + (T7 * P5))$$

$$C4 = ((T1 * P1) + (T2 * P3) + (T3 * P2) + (T4 * P2) + (T5 * P2) + (T6 * P2) + (T7 * P7))$$

C1: Cenário 1

C2: Cenário 2

C3: Cenário 3

C4: Cenário 4

T1: mapa temático 1 (Densidade de drenagem)

T2: mapa temático 2 (Distância das sub-bacias ao reservatório)

T3: mapa temático 3 (Coeficiente de variação de pluviosidade)

T4: mapa temático 4 (Pedologia)

T5: mapa temático 5 (Geologia)

T6: mapa temático 6 (Geomorfologia)

T7: mapa temático 7 (Uso e cobertura da terra)

P: pesos

5. Resultados e discussão

Na seqüência serão apresentados os mapas temáticos individualizados com suas classes ponderadas de 1 a 5 para cada sub-bacia (**figura 2-A,B,C,D,E,F e G**), conforme o seu nível de contribuição para o fenômeno em questão. A partir da legenda torna-se possível a identificação e comparação dos diferentes níveis de contribuição das sub-bacias entre os sete temas considerados.

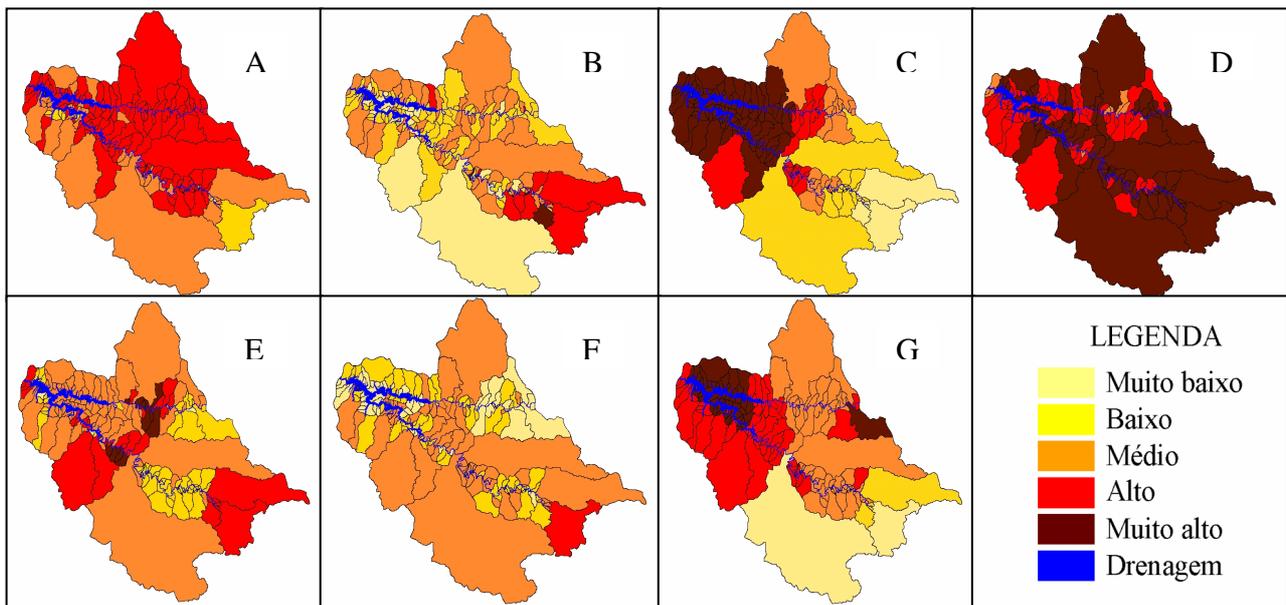


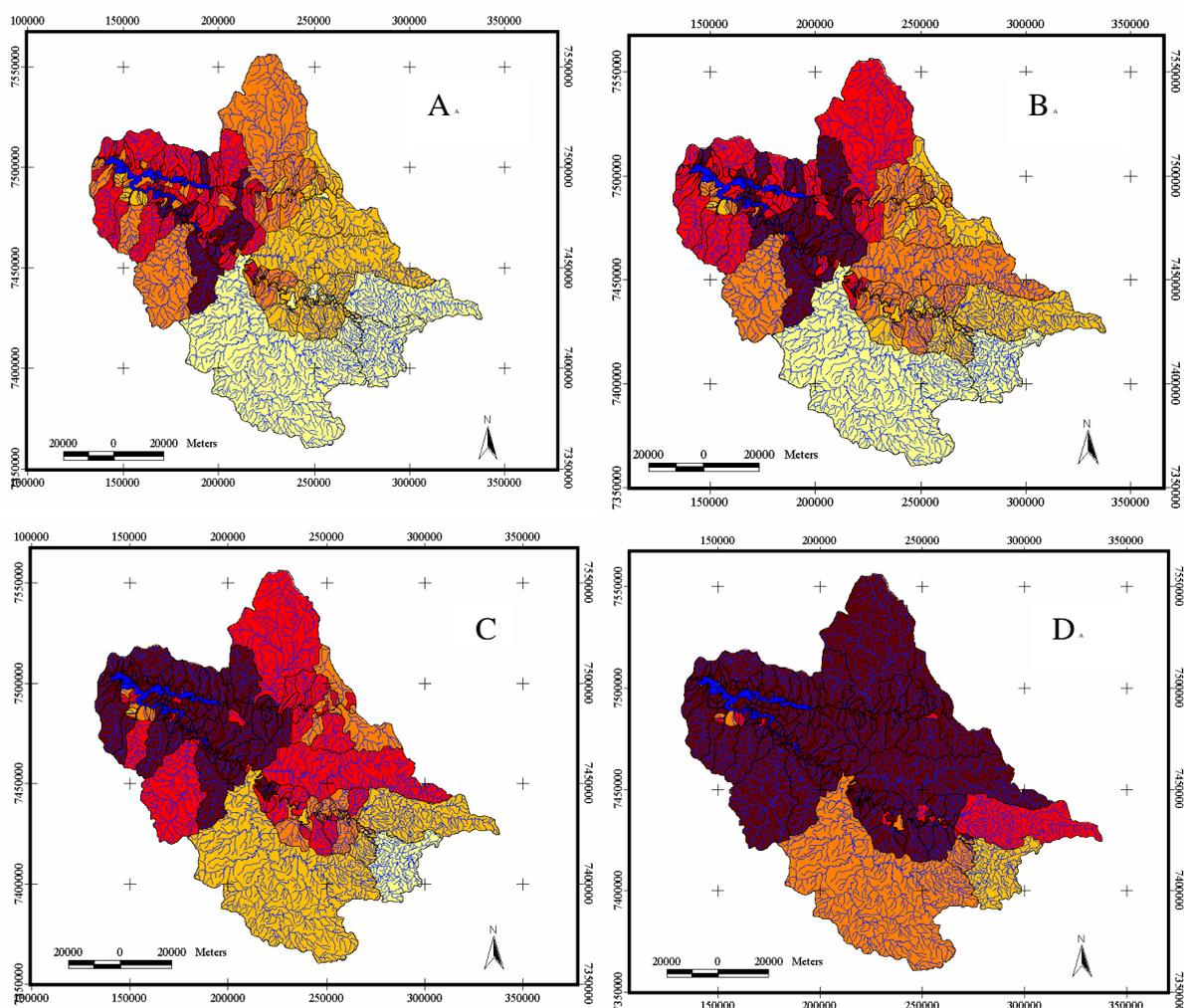
Figura 2: Mapas resultantes da ponderação das classes temáticas sendo A - Uso e cobertura da terra, B - Densidade de drenagem, C - Distância das sub-bacias ao reservatório, D - Pedologia, E - Geologia, F - Geomorfologia e G - Coeficiente de Variação de Pluviosidade (CVP).

Observou-se que cada tema apresenta um comportamento diferenciado. No caso da pedologia (figura 2D), a maior parte das sub-bacias apresentou uma contribuição muito alta ao passo que no caso da geologia e geomorfologia (figuras 2E e 2F), a maioria das sub-bacias apresentou uma contribuição média. A maioria dos temas apresentou uma contribuição maior nas áreas localizadas nas regiões de relevo mais acentuado (sub-bacias localizadas à sudoeste da bacia), onde os processos erosivos são mais intensos e a drenagem é mais densa (figuras 2B, 2D, 2F e 2G).

Quanto ao uso e cobertura da terra (figura 2A), praticamente não ocorreu a classe muito baixa, visto que realmente a bacia é muito pouco vegetada e bastante antropizada. Pôde-se observar que as sub-bacias da porção norte do reservatório e rio Piracicaba até o rio Tietê apresentaram maior contribuição, provavelmente devido ao cultivo extensivo de cana-de-açúcar. Observa-se ainda que uma sub-bacia à direita inferior da bacia apresentou contribuição baixa, apesar de estar em regiões mais elevadas, isto deve ter ocorrido pelo fato desta estar abrigando parte de uma Unidade de Conservação (APA Jundiá/Cabreúva), sendo a região mais vegetada de toda a bacia.

Quanto à distância (figura 2C) a contribuição vai aumentando gradativamente até se aproximar do reservatório, o que já era previsível. Quanto à precipitação da bacia estudada (figura 2G), observou-se que as sub-bacias próximas ao reservatório, com algumas exceções, são as que possuem maior coeficiente de variação de pluviosidade. Este fato pode ser compreendido, visto que o reservatório de Barra Bonita possui uma superfície de evaporação bastante grande, aproximadamente 310,00 km² de área inundada, fator que pode estar influenciando a precipitação local.

No que diz respeito aos resultados da modelagem, aplicando-se álgebra de mapas (Soma Ponderada), os Cenários 1, 2, 3 e 4, na forma de mapas, podem ser visualizados na **figura 3 - A, B, C e D.**



LEGENDA



Figura 3: Mapas representando os Cenários obtidos a partir da modelagem sendo A – Cenário 1 (Peso 3), B Cenário 2 (Peso 4), C - Cenário 3 (Peso 5), D – Cenário 4 (Peso 7).

Ao comparar os Cenários 1, 2, 3 e 4 (Soma Ponderada) notou-se uma tendência de redução da área da classe muito baixo e um aumento da área da classe muito alto, haja visto que conforme se atribuiu maior peso ao tema uso e cobertura da terra, maior passou a ser o potencial das sub-bacias quanto ao transporte de poluentes ao reservatório de Barra Bonita. Este processo vai ocorrendo gradativamente até que todas as sub-bacias passem a ter um potencial máximo (classe Muito alto). No caso das classes intermediárias o comportamento foi variável. Contudo, observou-se que a classe baixo também tende a reduzir, quando o peso atribuído é muito alto, como foi o caso do C4 e que a classe médio se manteve bastante estável ao longo da simulação.

Os resultados obtidos após a modelagem foram bastante coerentes considerando que as sub-bacias associadas às classes muito alta ou alta são, predominantemente, as que estão mais diretamente relacionadas ao reservatório. Certamente a distância das sub-bacias em relação ao reservatório contribuiu para estes resultados, mas também o tipo de uso da terra que é intenso às margens do reservatório, a cobertura vegetal que se apresentou reduzida neste local e a presença de argissolos que são bastante susceptíveis à erosão, sem contar o coeficiente de variação de pluviosidade que se apresentou mais elevado nas proximidades do reservatório.

6. Conclusões

Apesar da subjetividade envolvida nos processos de ponderação, o modelo de análise multicritério aplicado se mostrou adequado ao planejamento de bacias visando a proteção dos recursos hídricos, principalmente quando se trata de áreas bastante extensas (escala regional). Esta metodologia pode ser utilizada para identificar áreas prioritárias à intervenção no sentido de otimizar o uso e ocupação das terras, recuperar áreas degradadas, reflorestar áreas de nascentes e margens dos rios, reduzir a aplicação de defensivos agrícolas, minimizar os processos erosivos, dentre outras práticas que venham diminuir as fontes difusas de poluição e, conseqüentemente, assegurar melhor qualidade da água.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo número 00/102682-1, pelo apoio financeiro e ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio técnico e de infra-estrutura.

8. Referências bibliográficas

- Calijuri, M. C. **A comunidade fitoplanctônica em um reservatório tropical (Barra Bonita, SP)**. 211p. Tese (Livro-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- Chavez Jr., P. S. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.
- Chavez, Jr., P. S. Image-Based Atmospheric Corrections Revisited and Improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.62, n° 9, p.1.025-1.036, 1996.
- Felicidade, N.; Vargas, M. C.; Miranda, C. O. O processo de interiorização do desenvolvimento e suas implicações ao acesso e uso da água pelo cidadão: desafios econômicos, sociais e político-institucionais do caso paulista. In: Felicidade, N.; Martins, R. C.; Leme A. A.(org.). **Uso e Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**. São Carlos: Editora RIMA. 2001. Cap.13, p. 224-236.
- Guerra, A. J. T; Silva, A. S. da; Botelho, R. G.M. (org.). **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Técnicas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1999.
- Kuhnle, R.A.; Binger, R.L.; Foster, G.R.; Grissinger, E.H. Effect of land use changes on sediment transport. **Water Res. Res.**, v.32, p.3.189-3.196, 1996.
- Machado, R. E.; Vettorazzi, C. A.; Xavier, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.27, n.4, 2003.
- Pessoa, M.C.P.Y.; Luchiari, A.J.; Fernandes, E.N.; Lima, M.A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. EMBRAPA. CNPMA. **Documentos**, Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA, n. 8, 83p., 1997.