

## **Sensoriamento remoto (SR) e sistema de informações geográficas (SIG) para modelagem de qualidade da água. Estudo de caso: bacia do rio Cuiabá.**

Michely Libos<sup>1</sup>  
Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>1</sup>  
Peter Zeilhofer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE  
Caixa Postal 68540 - 21945-970 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
michely@hidro.ufrj.br / Otto@hidro.ufrj.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT  
Departamento de Geografia - Av.: Fernando Corrêa da Costa, s/nº,  
Coxipó da Ponte; CEP: 78060-900 – Cuiabá – MT, Brasil  
pitalike@terra.com.br

**Abstract.** The possibility of monitoring of the pollution on fresh water, resulted of the flow thru agricultural areas, know as diffuse pollution, was possible because of the two important tools, remote sensing and geographic information system, those were used in this work. The Cuiabá river basin, with drainage area of approximately 29.000 km<sup>2</sup>, was chosen by being located in the state of Mato Grosso – Central Brazil, that possesses a vocation eminently agricultural, being located to amount of the Swampland complex, being constituted in an important area for conduction of environmental studies in Brazil. In that context, it is evaluated the space distribution of the pollutants total phosphorus and total nitrogen in the basin, starting from the integration of multiples datas (hydrometeorologicals, water quality, landuse, images of sensor Landsat 7 - ETM+ in GIS environmental). The results obtained by the modelling, when confronted with historical series of water quality of the Cuiabá river basin, they aimed the acceptability of the methodology proposal as indicative of the space variability of the medium water quality.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, GIS, water quality, diffuse pollution, Cuiabá river basin.

### **1. Introdução**

Muitas são as ferramentas que são utilizadas para auxiliar os processos de avaliação ambiental e de gestão e bacias hidrográficas. O sensoriamento remoto e o sistema de informações geográficas são, nos dias de hoje, as mais utilizadas. Estes são utilizados para fornecer de forma clara, quantificada e circunstanciada o conjunto de impactos previsíveis e imprevisíveis de um empreendimento ou atividade.

No passado, a região do Estado de Mato Grosso despertou uma grande atração migratória com a exploração do ouro, nos dias atuais, o Estado posiciona-se entre os maiores produtores de grãos, considerado assim um dos principais celeiros do país. Bezerra e Veiga (2000) apontam o cerrado brasileiro como a última grande reserva de terras agricultáveis do planeta.

A agricultura, enquanto maior usuário da água doce em escala mundial, é o principal fator de degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, devido à utilização dos agrotóxicos e dos fertilizantes químicos engendrados nas diferentes práticas agrícolas.

Conciliar a expansão das fronteiras agrícolas com a preservação dos recursos hídricos representa um desafio técnico, econômico e ambiental na implementação da Política Estadual dos Recursos Hídricos, lei nº 6.945 de 1997, que instituiu instrumentos para promover a gestão e o controle dos recursos hídricos do Estado.

Dentro desse enfoque, buscou-se realizar uma classificação das imagens que compõem a bacia do rio Cuiabá para que pudesse ser obtida as categorias de uso e ocupação do solo da mesma. Este estudo ganha em relevância devido ao fato da bacia do rio Cuiabá estar localizada a montante do complexo Pantanal, estando inserida em um Estado com vocação

eminentemente agrícola. A abordagem adotada contempla o uso de imagens de sensoriamento remoto do tipo Landsat 7 - ETM+ para a obtenção da classificação da cobertura e uso do solo bem como o uso de sistema de informações geográficas para a obtenção de mapas temáticos. Como implementação, este estudo buscou também identificar e quantificar as alterações da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá em função da cobertura e uso do solo. Especificamente, avaliou-se a distribuição espacial dos poluentes fósforo total e nitrogênio total na bacia a partir da integração de uma base de dados de natureza múltipla com vistas a analisar os impactos decorrentes das cargas desses nutrientes não pontuais provocados pelas atividades agrícolas praticadas na bacia.

## **2. Estudo de caso: bacia do rio Cuiabá**

De acordo com PCBAP (1997), a bacia do rio Cuiabá, situado no Estado de Mato Grosso, totaliza aproximadamente 29.000 km<sup>2</sup> de área, com perímetro de 841 km, abrangendo as cabeceiras dos rios Cuiabá da Larga e Cuiabá do Bonito, que são formadores do rio Cuiabá até a confluência do rio Coxipó-Assú, pouco a jusante da cidade de Santo Antônio do Leverger. Nesse perímetro, estão inseridos 13 municípios: Rosário Oeste, Nobres, Jangada, Nossa Senhora do Livramento, Nova Brasilândia, Chapada dos Guimarães, Planalto da Serra, Santo Antônio do Leverger, Campo Verde, Barão de Melgaço e, entre esses, Cuiabá e Várzea Grande, principais núcleos urbanos do estado (Vital et al., 1996). A bacia está localizada entre os paralelos 14°18' e 17°00' S e entre os meridianos 54°40' e 56°55' W (Cavinatto, 1995).

### **2.1. Características da exploração e ocupação da bacia**

A bacia do rio Cuiabá caracteriza-se por uma grande diversificação nas formas de apropriação dos recursos naturais. É constituída por duas grandes formações naturais com características bióticas e abióticas definidas e próprias: a planície do Pantanal e as áreas de planalto e serras circunvizinhas. Dessa forma, a bacia do rio Cuiabá apresenta três regiões, conforme segue (Vital et al., 1996):

- alto Cuiabá - caracterizado por apresentar uma vegetação do tipo cerrado em que a agricultura é uma das atividades predominantes, onde ocorrem monoculturas principalmente de soja, milho e arroz;
- médio Cuiabá - essa região atravessa a baixada Cuiabana, compreendendo a área de depressão entre as partes mais altas do planalto e o início da planície inundável, onde há uma intensificação dos impactos ambientais sobre o rio Cuiabá, oriundos da concentração das atividades industriais, dos lançamentos de esgoto doméstico e do uso de dragas de areia em grande parte da região, principalmente nas cidades de Cuiabá e Várzea Grande; no médio-norte da bacia, a ocupação apresenta-se também na forma de pastagens em áreas de solos pobres e, portanto, mal-formadas;
- baixo Cuiabá - esse trecho é constituído de planícies de inundação (área pantaneira), em que a integridade ecológica depende principalmente da ecodinâmica das terras altas;

A **Figura 1** apresenta a delimitação da área de estudo com os seus limites físicos.

## **3. Metodologia**

Utilizou-se o código computacional ER Mapper 5.5 (ER MAPPER, 1997) para processamento das imagens digitais. As imagens de satélite utilizadas foram de julho de 2000. Para a análise da qualidade da água, foi empregada metodologia desenvolvida primeiramente por Saunders e Maidment (1996) e aplicada, posteriormente, na bacia do rio Cuiabá por Libos (2002).

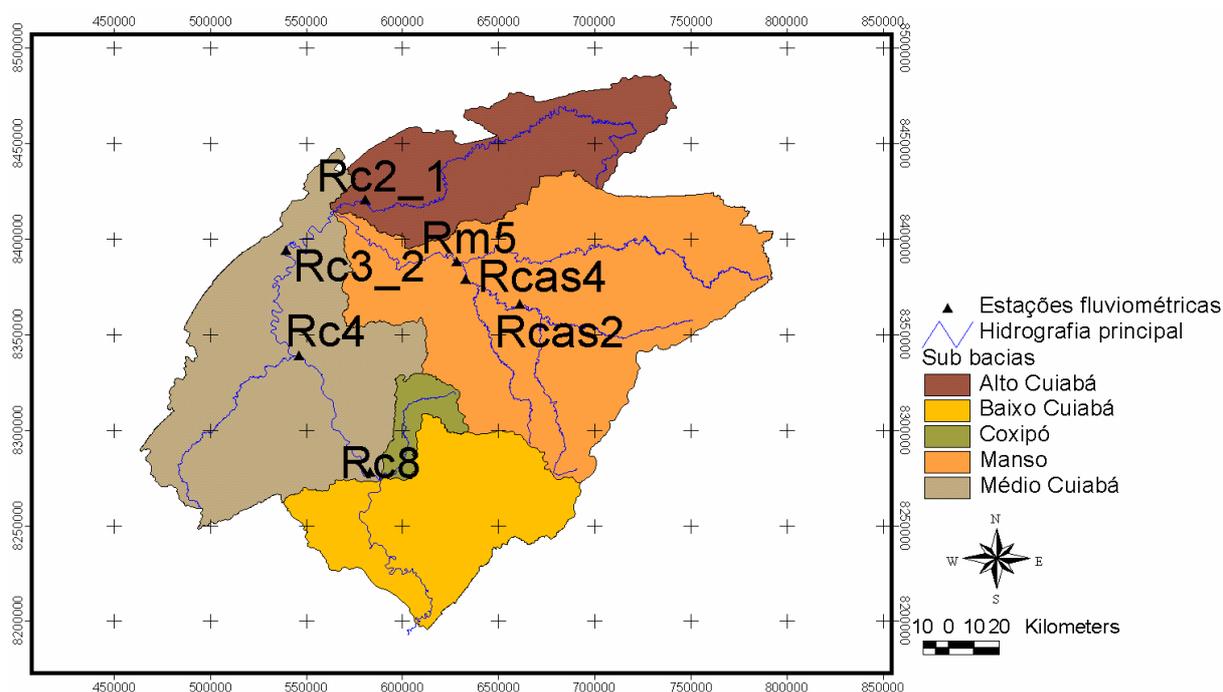


Figura 1 – Área de estudo: sub-bacias do rio Cuiabá.

### 3.1. Sensoriamento Remoto

Para cobrir a área da bacia do rio Cuiabá, foram adquiridas 4 (quatro) imagens multiespectrais do tipo Landsat 7 – ETM+ (índices WRS 226/70 e 226/71 de 02 de julho de 2000 e índices WRS 227/70 e 227/71 de 27 de julho de 2000), com resolução de 30 m x 30 m nas seis bandas utilizadas correspondentes à faixa do visível e infravermelho (#1, #2, #3, #4, #5 e #7). Conforme uma identificação preliminar da área de estudo em cada cena, aplicou-se um recorte na imagem, abrangendo o espaço geográfico a ser analisado.

A correção geométrica de cada imagem recortada foi realizada através de pontos de controle nas imagens, utilizando confluências e pontos notáveis da rede hidrográfica digitalizada da bacia, oriunda das cartas topográficas 1:100.000 da região (sistema UTM, datum SAD 69).

Destaque-se que os valores digitais dos píxeis foram determinados com base no emprego de polinômio de primeira ordem e no processo de reamostragem pelo vizinho mais próximo. A escolha desse algoritmo está baseada no fato de que não há alteração no tom de cinza, preservando as características de variabilidade espacial da imagem original, que é importante no processo de classificação das imagens.

### 3.2. Procedimento de classificação

O procedimento de classificação adotado consistiu de uma classificação não supervisionada seguida de uma classificação supervisionada. Para a classificação não supervisionada, foi utilizado o método denominado de isodata, enquanto o método de máxima verossimilhança foi empregado para a classificação supervisionada.

### 3.3. Implementação da classificação na bacia do rio Cuiabá

Após análise do Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai, PCBAP (1997), uma investigação visual das imagens, visitas de campo e classificação não supervisionada, foi possível identificar as várias formas de ocupação do solo e estabelecer uma legenda preliminar.

As áreas de treinamento foram enquadradas em dez classes de cobertura e uso do solo (água, cerrado, plantação, sombra, floresta, solo aberto e pasto), que foram, após a classificação, consolidados em sete classes. Adicionou-se ainda a classe cidades, que foi definida a *posteriori* pela inserção de polígonos no mapa final de classificação.

Note-se que a classificação foi realizada em cada uma das quatro imagens individualmente, para depois serem reunidas com o auxílio do código computacional Arc/Info.

Destaca-se que o procedimento de classificação da cena WRS 226/70 diferiu-se das demais. Essa imagem cobre duas regiões bem distintas presentes na bacia do rio Cuiabá: o planalto e a baixada Cuiabana. Na região do planalto, os solos possuem melhores aptidões agrícolas, podendo ser encontradas grandes plantações de soja, de algodão, de milho, entre outras. Ocorrem poucas regiões com solo aberto. Por outro lado, na região da baixada Cuiabana, as plantações são vistas em áreas bem reduzidas em função de possuir solos empobrecidos.

Na análise das assinaturas espectrais, observou-se que havia uma miscigenação das classes quando se tratava de plantação e solo aberto. No processo de classificação conjunta da região de planalto e baixada Cuiabana, muitas áreas de plantação foram identificadas incorretamente como solo aberto no planalto, enquanto muitas áreas de solo aberto foram identificadas incorretamente como plantação na baixada Cuiabana. Optou-se, então, por dividir a classificação em duas etapas:

- para o planalto – definiram-se 39 (trinta e nove) áreas de treinamento de plantação no planalto e somente uma área de treinamento de solo aberto;
- para a baixada Cuiabana – a área de treinamento de plantação restringiu-se a somente uma, enquanto foram definidas dez áreas de treinamento de solo aberto.

Com esse procedimento, obtiveram-se duas classificações: uma mais fidedigna às características do planalto e distorções na região da baixada; a outra mais adequada às condições da baixada Cuiabana e distorções no planalto. Um polígono, traçado com base nas escarpas da Chapada dos Guimarães, dividiu-a em duas, planalto e baixada Cuiabana. As duas classificações foram, em seguida, reunidas em uma mesma imagem.

### **3.4. Interligação entre a concentração média estimada de poluentes com o uso do solo**

A medida da carga difusa produzida durante um evento de escoamento pode ser dada pela concentração média esperada de poluentes ou EMC, definida como a massa de poluente transportada pelo volume do escoamento. Para este estudo, foi admitido que o EMC dos poluentes está relacionado diretamente com os usos do solo nas áreas de drenagem, restringindo a análise aos poluentes fósforo total e nitrogênio total.

Para estimar as cargas de poluentes, os valores das concentrações desses poluentes foram associados com o uso e ocupação do solo, obtido pela classificação de imagens de satélite Landsat 7 – ETM+. O resultado desse procedimento é a criação de novos planos de informação onde estão explicitadas as distribuições espaciais das concentrações de fósforo total e nitrogênio total.

Através do processo de modelagem de qualidade de água efetuado, foi possível, então, chegar aos valores finais de concentrações médias esperadas de fósforo total e nitrogênio total para a bacia do rio Cuiabá. Este procedimento consistiu na calibração e validação do processo de modelagem de qualidade de água adotado neste trabalho com base nos dados de fósforo total e nitrogênio total disponível no banco de dados do SIBAC (2000).

## 4. Resultados e discussões

### 4.1. Sensorimento remoto

Optou-se pela utilização das seis bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7) das quatro imagens de satélite Landsat 7 – ETM+. O erro obtido do processo de georeferenciamento foi da ordem de 58,73 m, aproximadamente 2 píxeis.

A fim de ilustrar e permitir avaliar os resultados obtidos no procedimento de classificação, apresenta-se a matriz de erros na **Tabela 1**, gerada a partir de áreas de validação, para a imagem WRS 227/70 de 27 de julho de 2000.

No caso da imagem WRS 227/70, o coeficiente kappa para a matriz de erros correspondente às áreas de validação foi de 0,80 (**Tabela 1**). Observa-se que parte da classe plantação foi identificada como pasto e como solo aberto. Note-se ainda que houve erros significativos de identificação associados às classes cerrado e floresta. As outras classes, com exceção do solo aberto, floresta, cerrado e plantação, tiveram índices de acertos acima de 0,80, mostrando bons resultados.

Cabe observar que o procedimento de análise estatística da classificação foi conduzido separadamente para cada uma das quatro imagens com base em áreas de treinamento calibração (kappa médio igual a 0,89) e de validação (kappa médio igual a 0,78). O resultado foi o mapa do uso e ocupação do solo apresentado na **Figura 2**.

Tabela 1 – Matriz de erros das áreas de validação (WRS 227/70).

		Real									
		Plantação	Solo aberto	Cerradão	Pasto	Água sed	Água	Floresta	Sombra	Cerrado	Total
Classificado	Plantação	1977	282	0	22	0	0	0	0	0	2281
	Solo aberto	366	821	1	123	0	0	3	0	0	1314
	Cerradão	0	2	2211	1	0	0	40	0	0	2254
	Pasto	0	2	0	2602	0	7	0	4	0	2615
	Água sed	0	0	0	0	111	13	0	0	0	124
	Água	0	1	0	0	0	984	0	1	0	985
	Floresta	0	0	20	0	0	0	854	0	1494	2368
	Sombra	0	0	0	0	0	1	5	958	1	965
	Cerrado	0	0	0	0	0	0	210	0	1533	1743
	Total	2343	1107	2232	2448	111	1005	1112	963	3028	14649

A área do planalto, região nordeste da bacia, apresenta uma maior quantidade de áreas de plantação, também podendo ser notada a presença de pastos. A região norte e a região próxima às cidades de Cuiabá e Várzea Grande (sudoeste) contam com regiões de pasto com maior frequência, quase não apresentando áreas de plantação. Toda a área da bacia apresenta floresta e cerrado, esse último com maior frequência.

### 4.2. Implementação do uso do solo para avaliação da qualidade da água

Os planos de informação da concentração média do fósforo total e do nitrogênio total foram estabelecidos com base na carga acumulada anual estimada dos nutrientes e na vazão acumulada anual em m<sup>3</sup>/s. Os valores gerados no processo de simulação em contraste com os valores observados de fósforo e nitrogênio total são expostos na **Tabela 2**.

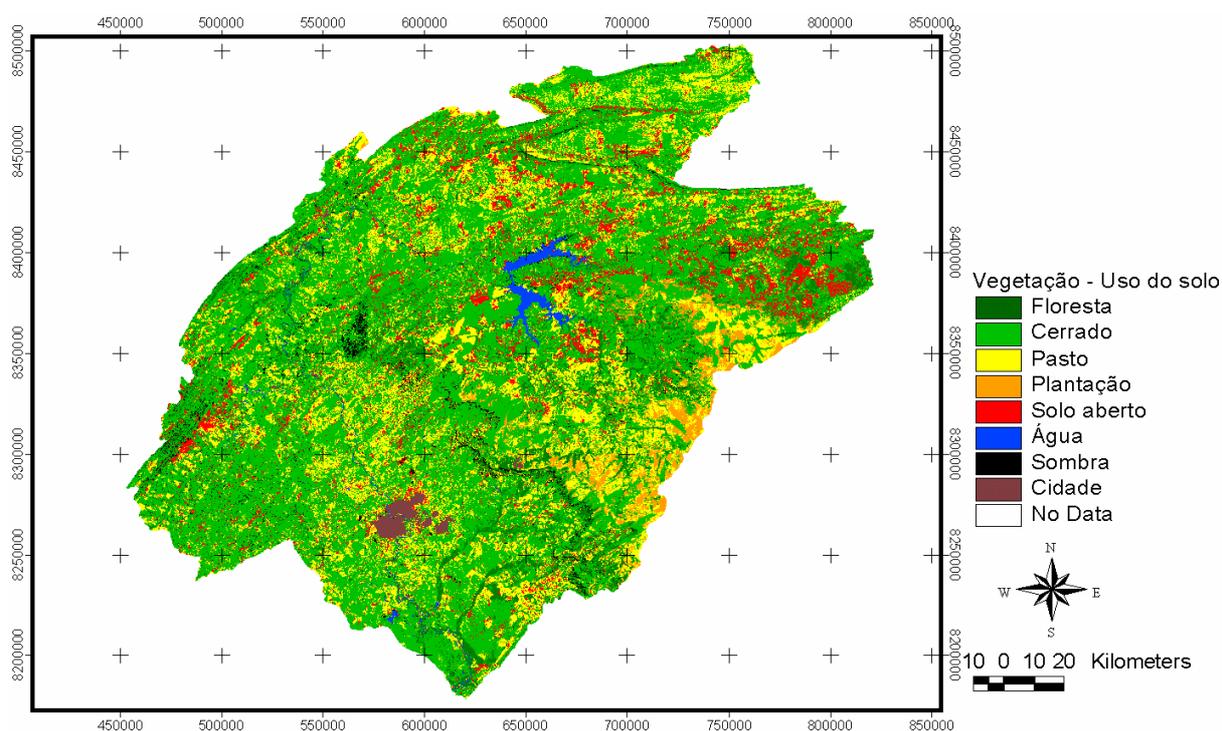


Figura 2 - Classificação do uso do solo baseada nas imagens Landsat 7 de julho 2000.

Tabela 2 - Valores observados e simulados de fósforo total nos postos fluviométricos conforme EMC's calibrados.

Posto	Valores observados (mg/l)		Valores simulados (mg/l)	
	NT	PT	NT	PT
Rcas2	0,24	0,089	0,33	0,110
Rcas4	0,19	0,053	0,28	0,082
Rm5	0,34	0,085	0,26	0,044
Rc2_1	0,21	0,052	0,23	0,019
Rc3_2	0,31	0,097	0,24	0,063
Rc4	0,30	-	0,21	0,082
Rc8	-	0,098	0,20	0,034

A validação dos valores simulados foi feita através da condução de testes de hipótese, ao nível de confiança de 95%, para os valores esperados de concentração média nos diferentes postos de medição, tendo como referência os valores amostrais desse poluente disponíveis no SIBAC (2000). Somente com relação ao fósforo total, os resultados indicam que haveria rejeição somente para as estações Rm5 e Rc8. As concentrações do fósforo total e do nitrogênio total nos cursos de água da bacia do rio Cuiabá, em mg/l, podem ser visualizadas na **Figura 3** e **Figura 4**, respectivamente. Pode-se notar uma concentração maior dos poluentes na porção sudeste da bacia, região do planalto.

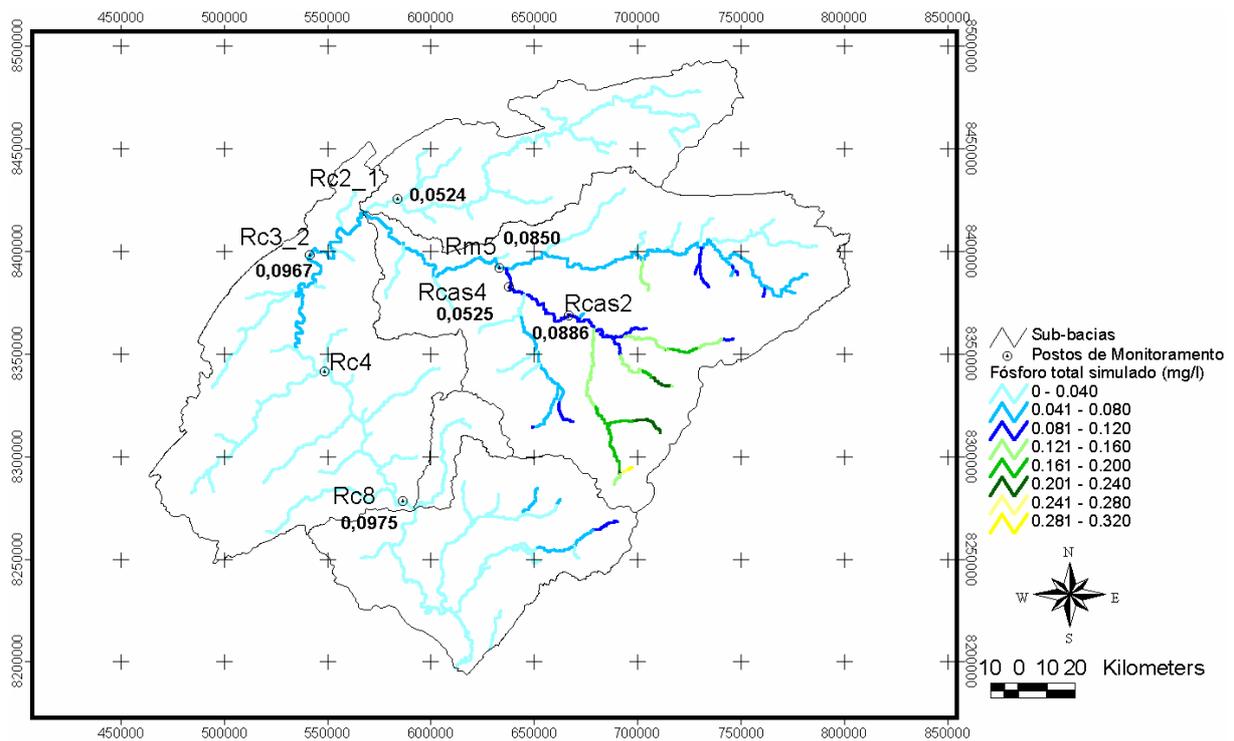


Figura 3 – Concentração estimada de fósforo total na bacia do rio Cuiabá.

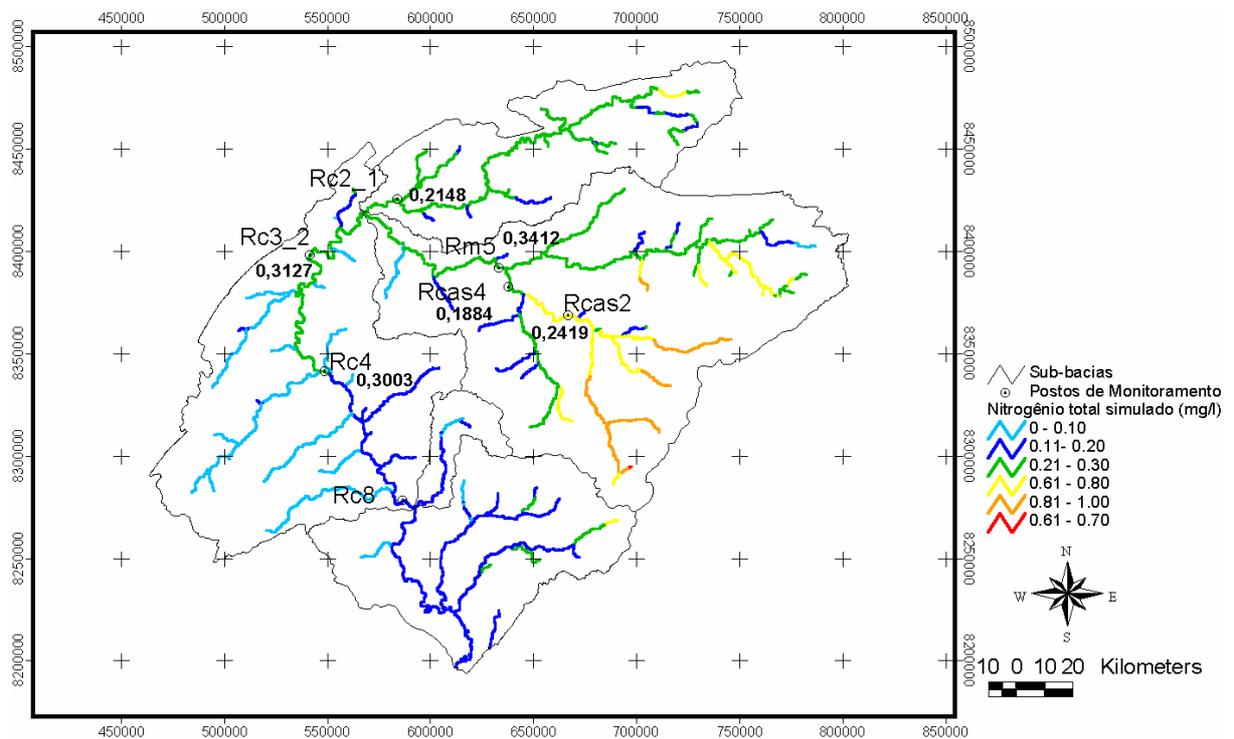


Figura 4 – Concentração estimada de nitrogênio total na bacia do rio Cuiabá.

A concentração de fósforo total nos cursos de água indicou uma maior contribuição desse constituinte na porção leste da bacia, região correspondente às sub-bacias Rcas2 e Rcas4, que apresentam maiores percentuais de áreas cultiváveis em relação às demais sub-bacias. Os valores das concentrações simuladas nessas estações variam de 0,081 a 0,120 mg/l, enquanto que, para as sub-bacias localizadas no curso principal do rio Cuiabá, Rc3\_2, Rc4 e Rc8, a

concentração simulada diminuiu variando de 0 a 0,080 mg/l. Esses valores inferiores ocorreram devido à ocupação do solo dessa área ser predominantemente de pasto, além do efeito da diluição ocasionada pelos tributários. Nessas áreas, correspondentes às regiões oeste e sul, os valores observados de fósforo total superaram os valores simulados. Essa característica pode ser atribuída à contribuição adicional de fósforo total advinda da poluição por fonte pontual, uma vez que há presença de cidades com lançamento de esgotos. Na porção norte da bacia, referente à estação Rc2\_1, os valores das concentrações de fósforo total simulados são um pouco mais próximos aos valores observados. Nessa região, a ocupação do solo é predominantemente composta pela vegetação natural, não havendo grandes interferências das áreas agricultáveis e nem das cidades.

As concentrações mais elevadas de nitrogênio total foram simuladas também na porção leste da bacia (Rcas2 e Rcas4), onde possui uma maior área agricultável. A concentração ao longo do principal curso de água dessa região, que é o rio Manso, foi simulada variando de 0,21 a 0,80 mg/l. As concentrações observadas ao longo desse mesmo trecho são menores que os valores simulados. Uma possível explicação reside na perda de nutrientes ao longo do rio Manso, possivelmente como resultado da sedimentação ou decaimento desse poluente. Já nas regiões oeste e sul da bacia (Rc3\_2, Rc4 e Rc8), onde a vegetação natural, os solos abertos e as cidades estão mais presentes que na porção leste, os valores observados das concentrações de nitrogênio total são maiores que os valores simulados. Essas diferenças de concentração no nitrogênio total são atribuídas às fontes não pontuais que são lançadas ao longo do trecho das porções oeste e sul da bacia (Rc3\_2, Rc4 e Rc8), visto possuir, em suas margens, algumas cidades que lançam efluentes domésticos e industriais, muitas vezes, sem qualquer tratamento preliminar. Na porção norte da bacia, estação Rc2\_1, os valores simulados aproximaram-se de forma satisfatória dos valores observados. Alternativamente, o fato de não haver sido incluída perda de poluentes na modelagem, pode induzir a uma simulação de concentrações elevadas de nitrogênio total para essa região.

Cabe salientar que a poluição por nutrientes de fontes difusa, mais especificamente oriundas das atividades agrícolas, possui uma alta significância local e regional. Por esse motivo, a preocupação com relação aos problemas gerados por excesso de nutrientes está ligada não só à bacia do rio Cuiabá, que possui rios lóticos, mas também ao complexo Pantanal, situado a jusante dessa bacia, onde seus corpos de água são lênticos, o que prejudica o processo de autodepuração, aumentando a capacidade de eutrofização dos corpos de água.

## **5. Conclusões**

O objetivo mais amplo desta pesquisa constituiu-se em trabalhar imagens de satélites para que fossem extraídas informações relevantes para posteriores aplicações na área ambiental, como a avaliação da qualidade da água da bacia do rio Cuiabá, que considerou as contribuições oriundas da poluição difusa através de uma modelagem distribuída baseada em geoprocessamento, desenvolvida por Saunders e Maidement (1996) e Libos (2002). Mais especificamente, este trabalho contemplou a análise da distribuição espacial dos poluentes fósforo total e nitrogênio total, de modo a explicitar os efeitos causados pela ocupação do solo na bacia de estudo.

Como conclusão deste trabalho pode-se afirmar que: (1) o mapa oriundo dos passos metodológicos do processo de classificação de imagens de satélite originou uma importante ferramenta para realização da simulação da concentração de poluentes, de maneira bastante satisfatória; (2) os resultados apresentados, apesar das limitações encontradas, descreveram o comportamento da bacia; (3) esta metodologia pode ser aplicada a qualquer bacia para poder estimar as cargas que escoam para os cursos de água, inclusive, para bacias que possuem

poucos dados de monitoramento, sendo uma característica desse procedimento, não exigir grande quantidade de dados de entrada.

Este estudo mostrou que a região do planalto, com uma grande percentagem de áreas agricultáveis englobou localizações onde os níveis mais elevados de fósforo total foram encontrados.

Uma importante ferramenta na prevenção de poluição seria a adoção de programas de gerenciamento das práticas agrícolas, com a finalidade de regular as quantidades de nutrientes que são aplicadas nas diferentes culturas. Esse programa contemplaria a lei 9.433 de 1997 que requer um monitoramento da qualidade da água.

Finalmente, espera-se que a pesquisa desenvolvida traga novas perspectivas para subsidiar planejamento da gestão dos recursos hídricos em bacias em que o monitoramento encontra-se em fase inicial.

## 6. Referências bibliográficas

- Bezerra, M. C. L., Veiga, J. E., Agricultura Sustentável, Brasília, Ministério do Meio Ambiente; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; Consórcio Museu Emílio Goeldi, 2000.
- Cavinatto, V., Caracterização Hidrológica da Estado de Mato Grosso. PRODEAGRO/SE-PLAN/FEMA, Cuiabá, MT, 1995.
- ER MAPPER – Earth Resource Mapping, 1997, User Manual, version 5.5, Disponível em: <http://www.ermapper.com> Acesso em: 27 de janeiro de 2001.
- Horwitz, H. M., Nalepka, R. F., Ryde, P. D., et al., “Estimating the Proportions of Objects Within a Single Resolution Element of a Multispectral Scanner”. In: Internacional Symposium on Remote Sensing of Environment, Proceedings Ann Arbor, Mi, Willow Run Laboratories, New York, U.S.A., p.p.1307-1320, 1971.
- Libos, M. I. P. C., Modelagem da Poluição Não Pontual na Bacia do Rio Cuiabá Baseada em Geoprocessamento, Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.
- Novo, E. M. L. M., Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989.
- PCBAP - Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai, 1997, v. 2.
- Richards, J. A, Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction, Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- Rosenfield, G. H., Fitzpatrick-Lins, K., "A coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 52, n 2, pp. 85-91, 1986.
- SIBAC – Sistema de Monitoramento Integrado da Bacia do Rio Cuiabá, Relatório de Modelagem Integrada da Bacia do Rio Cuiabá, PROPEP, 2000.
- Saunders, W., Maidment, D., A GIS Assessment of Nonpoint Source Pollution in the San Antonio-Nueces Coastal Basin, Center for Research in Water Resources, Online Report 96-1, University of Texas at Austin. Austin, Texas, 1996.
- Vital, A. R., Costa, E. S., Curvo, M., et al., Projeto de Recuperação e Conservação da Bacia do Rio Cuiabá, FEMA-MT, Cuiabá, MT, 1996.