

Efeitos dos barramentos e de mudanças de uso do solo na turbidez do rio Tietê (1984-2011): análise em escala de bacia

Effects of dams and land use changes on Tietê River turbidity (1984-2011): basin-scale analysis

Rodrigo Blaudt Lima da Silva *, Otávio Cristiano Montanher **

* Departamento de Geografia - Universidade Estadual de Maringá/PR, Brasil, e-mail: rodrigo.blaudt@outlook.com

** Departamento de Geografia - Universidade Estadual de Maringá/PR, Brasil, e-mail: otaviocmontanher@yahoo.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v55i0.79563>

Resumo

O presente trabalho teve por objetivo identificar padrões e tendências espaço-temporais da turbidez no rio Tietê, a partir do reservatório de Barra Bonita até Três Irmãos e avaliar as relações com a existência de barramentos ao longo do curso fluvial com mudanças de uso do solo da bacia hidrográfica. Foi gerada uma série histórica de turbidez estimada com 27 anos (1984-2011), a partir de imagens Landsat 5. Produtos do projeto MapBiomas foram utilizados para análise da dinâmica de uso do solo. Foram aplicados testes de tendência temporal (Seasonal Kendall) para a turbidez de cada um dos reservatórios do sistema fluvial, e sobre o período pré e pós barramento da usina hidrelétrica de Três Irmãos. Esses testes indicaram diminuição da turbidez em três reservatórios (Barra Bonita, Ibitinga e Bariri) os demais pontos amostrados não apresentaram tendência significativa (Promissão, Nova Avanhandava e Três Irmãos). Destaca-se que, considerando apenas o período pós barramento, houve aumento significativo da turbidez no reservatório da UHE Três Irmãos. Por fim, foi feita uma análise para avaliar em conjunto os efeitos de mudanças de uso do solo e dos reservatórios sobre as tendências de turbidez estimadas. Assim, observou-se que o efeito dos barramentos foi um pouco mais importante para as alterações da turbidez do que as mudanças de uso e ocupação do solo, caracterizadas principalmente pela redução na área de pastagens e aumento da cana-de-açúcar. O efeito do uso do solo sugere que quanto maior o avanço da cana-de-açúcar, menos pronunciada foi a redução na turbidez.

Palavras-chave: Análise espaço-temporal; Sensoriamento Remoto; Uso e ocupação do solo; Reservatórios; Rio Tietê.

Abstract

The present project aimed to identify spatial patterns and temporal trends of the turbidity, correlating it with the land use and land cover of the Tiete watershed. The turbidity was estimated in twenty-seven years (1984-2011), with Landsat 5 images. Products of land use and land cover (lulc)

of the MapBiomias project were used to evaluate the dynamics of land use and land cover. Were applied temporal trends (Seasonal Kendall) tests for each one of the reservoirs in the fluvial system, and over the period before and after dam construction from Três Irmãos hydroelectric plant. The tests indicate that turbidity from half of the reservoirs analyzed trends to decrease (Barra Bonita, Ibitinga and Bariri), the other half showed no trends (Promissão, Nova Avanhandava and Três Irmãos). Nevertheless, it stands out the increasing turbidity trend from the Três Irmãos reservoir after dam construction. At last, an analysis has been made to evaluate the effects of lulc and the dams constructions over the estimated turbidity. The results from this analysis shows that the effects from the dams were more significant to the turbidity changes than the lulc, characterized mainly by a reduction in the area of pastures and a respective increase in sugarcane. The land se effect suggests that the greater the advance of sugarcane, the more pronounced was the reduction in turbidity.

Keywords: Spatiotemporal analysis. Remote Sensing. Land use and land cover. Reservoirs; Tiete River.

I. INTRODUÇÃO

Cerca de metade dos principais rios do mundo apresentaram uma tendência significativa de variação da carga suspensa no século XX, tendo como principais causas a construção de reservatórios, que resultaram na diminuição do fluxo de sedimentos, e em alterações no uso do solo (desmatamentos, por exemplo), que levaram ao aumento da carga (WALLING e FANG, 2003). Os demais rios avaliados pelos autores não apresentam tendência alguma de variação na carga suspensa, indicando um cenário onde não há construção de barramentos, ausência de alterações no uso e cobertura do solo – ou alterações acompanhadas de medidas de manejo que controlem os impactos, ou ainda, deposição do material erodido em seu percurso, seja na vertente ou no leito dos rios (WALLING e FANG, 2003).

A construção de barramentos para geração de energia hidrelétrica promove crescente sedimentação da carga suspensa ao longo do reservatório. Desse processo, desdobram-se impactos locais, como a redução do fluxo de sedimentos e a diminuição da turbidez no barramento (STEVAUX et al., 2009; WALLING e FANG, 2003; LATRUBESSE et al., 2017). À jusante do barramento essas alterações promovem impactos relacionados à ecologia aquática (STEVAUX et al., 2009), podendo comprometer inclusive o potencial de geração de energia hidrelétrica (CARVALHO et al., 2005). Além dos impactos locais mencionados, há impactos globais, como a alteração no ciclo geoquímico, que se relaciona com os processos denudacionais, contribuindo no transporte de sedimento dos continentes para os oceanos (WALLING e FANG, 2003).

A quantidade de carga suspensa transportada nos canais fluviais é também resultado dos processos geomorfológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, podendo decorrer de alterações de uso e ocupação do

solo. Sua análise permite uma compreensão do grau de preservação da cobertura vegetal encontrada na bacia, por exemplo. O transporte de sedimentos se inicia na bacia hidrográfica e depende de diversas variáveis internas ao sistema - como o relevo e o tipo da vertente, a presença ou ausência de cobertura vegetal, o tipo de solo e a ocupação da bacia; além de variáveis externas, como a precipitação (LELI et al., 2010).

Segundo Walling e Fang (2003), os dados coletados de carga suspensa são descontínuos e pouco frequentes, o que impede a elaboração de análises de séries temporais, como as de tendência. Conforme os autores, isso ocorre em várias regiões do globo, mas especialmente nos países em desenvolvimento, onde se espera uma mudança no comportamento do fluxo de sedimentos. Os autores ainda apontam que as falhas nas séries temporais ocorrem devido à suspensão ou falta de subsídios financeiros para monitoramento de longo prazo.

Uma alternativa ao monitoramento tradicional da carga sedimentar suspensa é o sensoriamento remoto, que possibilita a geração de modelos para estimativa do parâmetro. Isso é possível porque os materiais orgânicos e inorgânicos suspensos na água interagem com a radiação eletromagnética irradiante, produzindo alterações no fluxo radiante, o que possibilita a quantificação dos materiais (BARBOSA et al., 2019). A turbidez, variável de interesse deste trabalho, refere-se ao grau de atenuação sofrido pela luz ao interagir com a água, mantendo, portanto, relação com a carga suspensa, que é constituída de matéria orgânica e inorgânica (CETESB, 2020).

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento espaço-temporal da turbidez no sistema de reservatórios em cascata do rio Tietê, além de verificar o comportamento do parâmetro em relação ao uso e ocupação do solo. As seguintes hipóteses foram estabelecidas: i) as mudanças de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica podem ter promovido mudanças na turbidez dos sistemas aquáticos avaliados; ii) a série de barramentos existente no canal principal do rio Tietê pode gerar um padrão longitudinal de diminuição da turbidez a jusante; iii) o barramento realizado pela UHE de Três irmãos provocou diminuição da turbidez, devido ao processo de sedimentação à montante.

O reservatório mais a jusante, de Três Irmãos, é o único cujo período de construção foi compreendido pela série histórica do Landsat 5 (final da construção no ano de 1991). Por isso, esse foi o único caso em que foi possível avaliar o efeito total da implantação do reservatório. Também nesse caso específico, foram feitas análises de tendência para os períodos pré e pós barramento.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e base de dados

A bacia do Tietê (BHT) está localizada no estado de São Paulo, que desde a década de 1950 é o estado brasileiro com maior produção de cana-de-açúcar. Cerca de 6,84 milhões de hectares do território paulista são ocupados com o cultivo, o produto é utilizado na produção de etanol e açúcar. A expansão vem ocorrendo nas últimas décadas no interior do estado, onde parte da área pertence à BHT, substituindo, preferencialmente, áreas de pastagem (RONQUIM e FONSECA, 2018).

Essa bacia abrange seis usinas hidrelétricas (Figura 1), dispendo de um sistema de reservatórios em cascata. Na modelagem da turbidez foram utilizados 10 pontos da rede de monitoramento da CETESB (CETESB, 2020), localizados ao longo do rio Tietê (Figura 1), entre os anos de 1984 a 2011. Os dados desses pontos de coleta foram utilizados em conjunto com amostras de reflectância do satélite Landsat 5/TM (Tabela 1). Nessa escala temporal de análise foi compreendido o período de quatro anos pré barramento da usina hidrelétrica de Três Irmãos, construída no início da década de 1990. Já as séries temporais de turbidez foram estimadas para cada reservatório da bacia, incluindo reservatórios que não possuem estações de monitoramento.

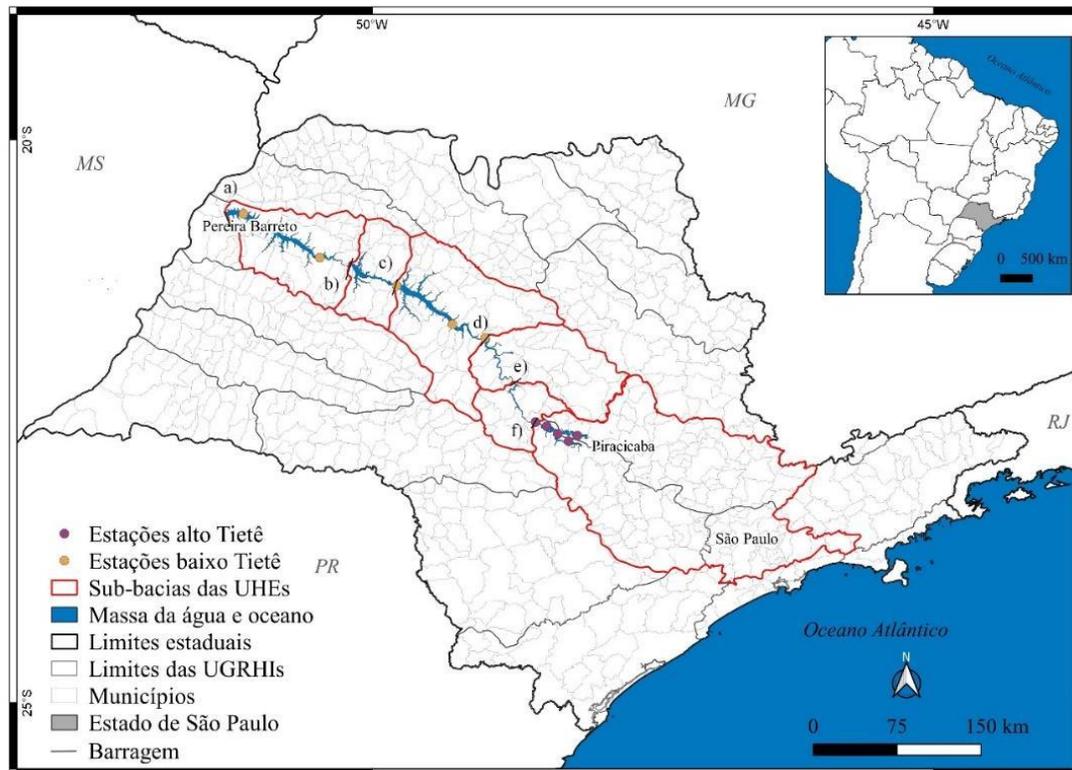


Figura 1: Área de estudo - Pontos de coleta da CETESB, sub bacias e localização das UHs: Três Irmãos (a); Nova Avanhandava (b); Promissão (c); Ibitinga (d); Bariri (e); e Barra Bonita (f).

Os produtos de uso do solo foram obtidos através do MapBiomas, são dados livres, podem ser acessados através da plataforma *web* (MapBiomas, 2020). Neste portal os resultados são apresentados conforme as divisões territoriais dos limites administrativos e hidrográficos. Outro meio de acesso e *download* dos dados pode ser feito através da plataforma em nuvem, que oferece maior amplitude de manipulação dos dados, por exemplo, quanto aos limites espaciais.

Procedimentos metodológicos

O procedimento metodológico desta pesquisa seguiu as etapas de: i) levantamento de dados; ii) modelagem; e iii) análises e correlações (Figura 2). As etapas estão descritas em detalhe nos tópicos a seguir.

Quadro 1: Códigos das estações de coleta in situ utilizadas, relacionadas com o sistema hídrico pertencente, data de início de coleta, sub bacia e referência regional do modelo para estimativa da turbidez.

Código da estação	Sistema hídrico	Data início	Sub bacia	Modelo Regional
TITR02800	UHE Três Irmãos	01/10/1974	Três Irmãos	Baixo Tietê
TITR02100	UHE Três Irmãos	06/11/1990	Três Irmãos	Baixo Tietê
TIPR02990	UHE Promissão	01/01/2007	Promissão	Baixo Tietê
TIPR02400	UHE Promissão	01/01/1978	Promissão	Baixo Tietê
TIET02600	Jusante UHE Ibitinga	01/10/1974	Ibitinga	Baixo Tietê
TIET02500	Jusante UHE Barra Bonita	01/10/1974	Barra Bonita	Barra Bonita
TIBB02700	UHE Barra Bonita	01/01/1995	Barra Bonita	Barra Bonita
TIBB02100	UHE Barra Bonita	01/01/1999	Barra Bonita	Barra Bonita
PCBP02500	Braço do Rio Piracicaba	07/11/1995	Barra Bonita	Barra Bonita
TIBT02500	Braço do Rio Tiete	01/01/1995	Barra Bonita	Barra Bonita

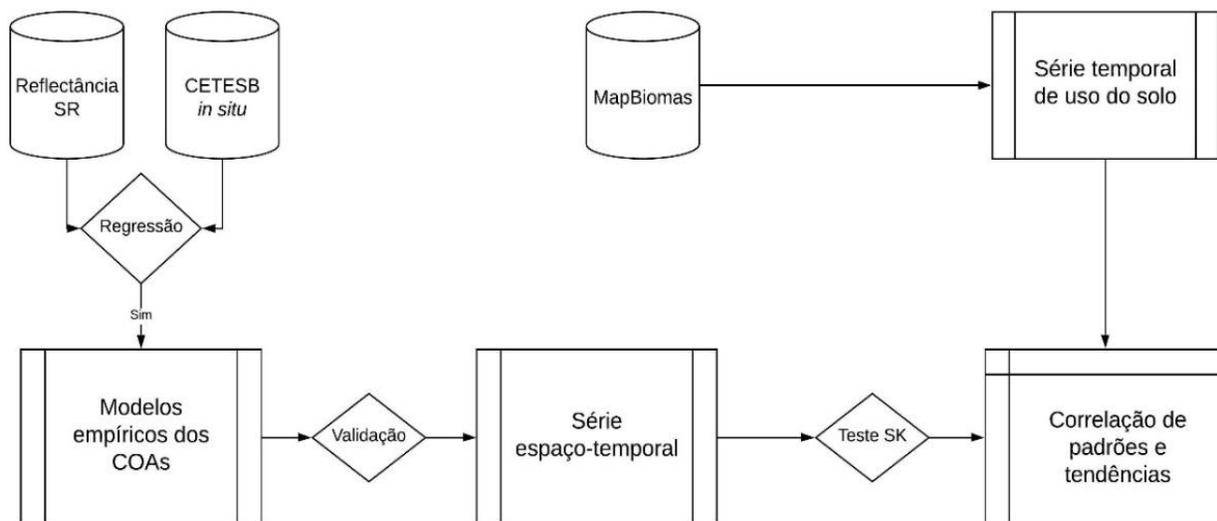


Figura 2: Fluxograma geral dos procedimentos metodológicos.

Estimativa da turbidez

Para o desenvolvimento dos modelos empíricos (BARBOSA *et al.*, 2019), da estimativa de turbidez com uso de imagens orbitais foi utilizado o sensor TM/Landsat 5, e dados de campo da rede de monitoramento da CETESB. Foi elaborado um *script* na plataforma GEE para extração automática dos valores de reflectância TOA referentes a cada ponto de coleta de campo. A metodologia aplicada na elaboração da modelagem empírica é semelhante à Montanher e Souza Filho (2015), Silva *et al.* (2019) e Cremon *et al.* (2020) diferenciando-se principalmente pela automatização dos procedimentos, desenvolvida na plataforma em nuvem *Google Earth Engine* (GORELICK *et al.*, 2017). Uma versão digital completa dos *scripts* pode ser acessada no portal *GitHub*.

Foram realizadas duas abordagens de modelagem. A primeira de caráter global considerou todas as estações de coleta da CETESB presentes no rio Tietê, enquanto que a segunda considerou uma regionalização (modelos específicos para diferentes estações de coleta). Isso porque, segundo Bernardo *et al.* (2019), o comportamento espectral de cada reservatório se modifica devido a retenção do material suspenso à jusante.

A modelagem do parâmetro turbidez foi realizada através de regressões simples e múltiplas, tanto em escala global como regional (Baixo Tietê e Barra Bonita). Na regressão a variável dependente foi o valor de turbidez (NTU) coletado *in situ*, e as variáveis independentes são valores de reflectância TOA e também razões de bandas (B2/B1, B4/B2, B3/B2+B1, B4+B3/B2+B1). As bandas utilizadas durante a modelagem tiveram o efeito de *sunlint* corrigido pela subtração da banda do infravermelho de ondas curtas (B5), que não se relaciona com os COAs.

Além disso, foram avaliadas regressões a partir do conjunto de dados particionado entre os períodos seco (maio, junho, julho, agosto e setembro) e úmido (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril). Isso porque assumiu-se a hipótese de que nos dois períodos, diferentes tipos de COAs e em diferentes concentrações podem ocorrer nos reservatórios. No período chuvoso, por exemplo, o escoamento superficial pode carrear maior quantidade de sedimentos inorgânicos para os corpos hídricos superficiais em relação à época mais seca do ano.

Por fim, selecionou-se o melhor conjunto de modelos de regressão dentre as abordagens mencionadas a partir de princípios como a parcimônia e a precisão das estimativas geradas. Tais modelos foram aplicados em uma série histórica de imagens, correspondente à cada UHE do sistema fluvial Tietê, resultando na série histórica de turbidez.

Áreas de contribuição

Considerou-se que a área de contribuição de uma bacia hidrográfica sobre o corpo hídrico de um reservatório se restringe ao segmento situado entre a jusante de barramento até a montante do barramento seguinte. Isso gerou dificuldades na definição das áreas de contribuição com base apenas nos principais afluentes do rio Tietê. Portanto, optou-se pela delimitação manual dessas áreas de contribuição, de modo que elas se referem ao conjunto de sub-bacias que atingem o canal principal nos trechos entre os principais reservatórios (Figura 1). Utilizando-se essa delimitação, os produtos de uso e cobertura do solo do Estado de São Paulo foram processados na plataforma GEE e foram obtidas as áreas totais e percentuais de cada classe de uso, em cada sub-bacia.

Análises estatísticas

Foram utilizadas quatro análises estatísticas, a primeira foi aplicada para testar tendências temporais das séries de turbidez, a segunda teve o objetivo de testar diferenças dessa variável entre os reservatórios, e a terceira teve como objetivo avaliar conjuntamente os efeitos de mudanças de uso do solo e dos reservatórios sobre as tendências observadas. O teste de tendências temporais selecionado foi o *Seasonal Kendall (SK)* que se trata de um teste não-paramétrico (HELSEL e HIRSCH, 2002). Optou-se por esta abordagem por dois motivos: i) a série temporal de turbidez possui muitas lacunas e ii) a turbidez possui dinâmica sazonal, com períodos com maiores valores (estações chuvosas) e períodos que frequentemente possuem menores valores (estações secas). Principalmente a segunda característica dos dados viola o pressuposto de independência exigido em

testes paramétricos. Os testes foram aplicados com uso do *software* disponibilizado gratuitamente pela USGS (HELSEL *et al.*, 2006).

Os testes SK foram aplicados para cada um dos reservatórios do sistema fluvial, e sobre o período pré e pós barramento da usina hidrelétrica de Três Irmãos. Foram definidas duas estações para aplicação do teste, do mesmo modo como para a elaboração do modelo de estimativa da turbidez: uma estação seca (maio, junho, julho, agosto e setembro) e outra chuvosa (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril). O segundo conjunto de testes aplicado refere-se à uma comparação realizada entre os reservatórios. Primeiramente avaliou-se a possibilidade de aplicação do teste de médias *t-student*, no entanto, as variáveis não apresentaram distribuição normal, condição necessária para aplicação desse teste paramétrico. Portanto, optou-se pelo teste de medianas de Mann-Whitney.

A terceira análise estatística refere-se à modelagem das tendências temporais, calculadas pelo teste SK, a partir das informações de variação do uso do solo nas bacias e da posição dos reservatórios em relação ao perfil longitudinal do rio Tietê. A regressão múltipla foi estruturada de modo que a variável dependente foi determinada como o coeficiente angular das retas ajustadas pelo método SK, variável que representa a direção e a intensidade da tendência temporal das séries de turbidez.

Foram determinadas duas variáveis preditoras, uma relacionada às mudanças de uso do solo na bacia e outra sendo a distância (em km) à jusante do primeiro barramento, em relação aos demais, ao longo do eixo longitudinal do rio. Em análise preliminar, observou-se que no período avaliado a principal mudança de uso do solo foi a substituição de pastagens pelo cultivo de cana-de-açúcar. A diminuição das pastagens ocorreu de forma consistente em todas as sub-bacias e ao longo de toda a série histórica, de modo que os coeficientes angulares das retas ajustadas, entre o tempo e a porcentagem de pastagens nas bacias, resumem a intensidade com que essas diminuições ocorreram em cada bacia. A última análise estatística compõe-se de testes padrões de variância (teste F) e média (teste t), utilizados para comparação dos valores de turbidez nos períodos anterior e posterior ao barramento. O nível de significância (α) adotado para todos os testes foi de 5%.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modelagem da turbidez e séries temporais de uso do solo

Foram adotadas diversas possibilidades de modelagem para estimativa da turbidez, em que nesse artigo estão apresentados apenas os modelos que forneceram as melhores estimativas, com base nos menores erros

de predição (menor RMSE) e menor complexidade (parcimônia). Os modelos escolhidos para aplicação nas imagens, com o objetivo de obtenção da série histórica da turbidez foram os regionais (Baixo Tietê e Barra Bonita) sem discriminação pela estação do ano (Quadro 1).

Através do *script* desenvolvido para extração dos valores de reflectância TOA, foram obtidas 97 amostras para estimativa da turbidez pelo modelo regional Baixo Tietê e 89 para o modelo regional de Barra Bonita (Tabela 1). O erro percentual da estimativa de turbidez para os pontos do Baixo Tietê (Figura 1) é de 39,55% enquanto que para os referentes a Barra Bonita de 43,13%. O resultado completo dos modelos gerados pode ser encontrado no portal *github*.

Tabela 1: Resultados do modelo regionalizado e sem distinção de estação do ano, para análise de regressão da estimativa de turbidez (k refere-se ao número de variáveis preditoras).

Modelo Baixo Tietê	N	k	R ²	R ² ajust	RMSE (NTU)	nRMSE (%)	p
Baixo Tietê	97	3	0,83	0,82	1,77	39,55	<0,00001
Barra Bonita	89	4	0,84	0,83	4,09	43,13	<0,00001

Entre os anos de 1985 a 2011 foram identificadas 14 classes de ocupação do solo nas sub-bacias hidrográficas do rio Tietê. O uso do solo é majoritariamente agropecuário, em que há predominância de três classes: pastagem, cultura semi-perene e mosaico de agricultura e pastagem. A cultura semi-perene a que este mapeamento se refere é principalmente a cana-de-açúcar. É interessante observar a tendência de aumento da cultura cana de açúcar (Figura 3, classes: semi-perene e mosaico) e diminuição das áreas de pastagem.

Dinâmica temporal da turbidez

As séries temporais de turbidez, relativas aos diferentes reservatórios, podem ser observadas na Figura 4. Ressalta-se que o reservatório Três irmãos é o único cuja conclusão das obras ocorreu no período analisado, por isso é o único a ser avaliado em dois períodos (pré e pós barramento, Figura 4).

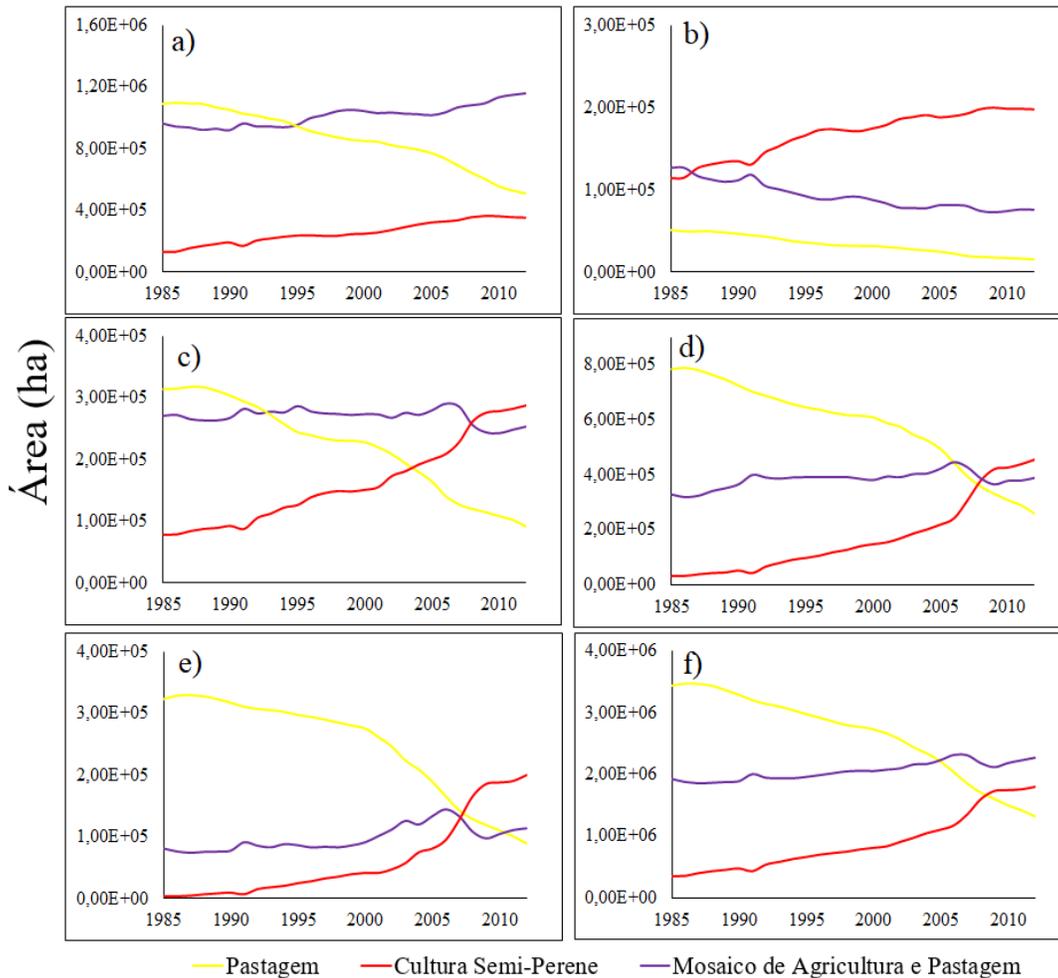


Figura 3: Dinâmica temporal das principais classes de uso e ocupação do solo nas bacias de Barra Bonita (a); Bariri (b); Ibitinga (c); Promissão (d); Nova Avanhandava; (e); Três Irmãos (f).

Os reservatórios situados mais a montante (Barra Bonita e Bariri) possuem valores de base próximos ou pouco inferiores a 10 NTU, mas com picos acima de 30 NTU relativamente frequentes, ao longo da série. Apesar de apresentar o maior valor de turbidez entre todas as estimativas, o reservatório de Ibitinga apresentou menor frequência de picos de turbidez. Os outros reservatórios, situados a jusante, possuem menor frequência de picos elevados de turbidez, não ultrapassando 20 NTU em Promissão, Nova Avanhandava e para o período pós barramento em Três irmãos.

Essa menor variabilidade e frequência de valores extremos dos valores em direção a jusante possivelmente está relacionada com a retenção de sedimentos promovida pelo sistema em cascata dos reservatórios. Outro fator que pode estar relacionado com a maior quantidade de picos de turbidez no setor de montante é o conjunto de características geomorfológicas das sub-bacias, em que as sub-bacias nessa área tendem a ter maior declividade em relação às sub-bacias de jusante. A maior declividade das vertentes facilita

um rápido escoamento superficial, carregando partículas com maior velocidade, o que resultaria em picos de turbidez mais intensos e frequentes.

Tabela 2: Descrição dos resultados das análises de tendência SK para os reservatórios do rio Tietê. * T = Tempo em ano decimal.

UHE	N	Equação *	τ	Valor-p	Período
Barra Bonita	220	$9,198 - 0,17160 \cdot T$	-0,284	0,0098	06/1984 – 10/2011
Bariri	399	$7,463 - 0,15480 \cdot T$	-0,444	0,0001	06/1984 – 10/2011
Ibitinga	234	$7,695 - 0,12850 \cdot T$	-0,284	0,0113	10/1984 – 10/2011
Promissão	290	$5,353 - 0,02473 \cdot T$	-0,042	0,6471	08/1984 – 11/2011
Nova Avanhandava	326	$3,664 + 0,03943 \cdot T$	0,130	0,1696	08/1984 – 11/2011
Três Irmãos	428	$3,763 - 0,05263 \cdot T$	-0,214	0,0635	04/1984 – 11/2011
Três Irmãos Pré Barragem	106	$5,552 - 0,05765 \cdot T$	-0,095	0,6234	04/1984 – 12/1990
Três Irmãos Pós Barragem	322	$1,739 + 0,07154 \cdot T$	0,445	0,0003	02/1991 – 11/2011
Total	1897	-	-	-	-

Com relação às tendências temporais, foram observadas tendências significativas, de diminuição para os pontos de coletas referentes às UHEs: i) Barra Bonita; ii) Bariri; iii) Ibitinga; e aumento para Três Irmãos no período pós barramento (Tabela 2). Para os demais reservatórios (Promissão, Nova Avanhandava e Três Irmãos período geral e pré barramento) não foi observada tendência significativa, tanto de diminuição como de aumento (Tabela 2).

Dinâmica longitudinal da turbidez

Em termos de distribuição longitudinal, observou-se que as tendências temporais de diminuição ocorreram nos reservatórios de montante (Barra Bonita, Bariri e Ibitinga), enquanto os demais reservatórios não apresentaram tendências temporais. A única ressalva é para o período pós-barramento do reservatório situado mais a jusante (Três irmãos), a única série que apresentou tendência de aumento, que embora seja significativa, é pouco intensa.

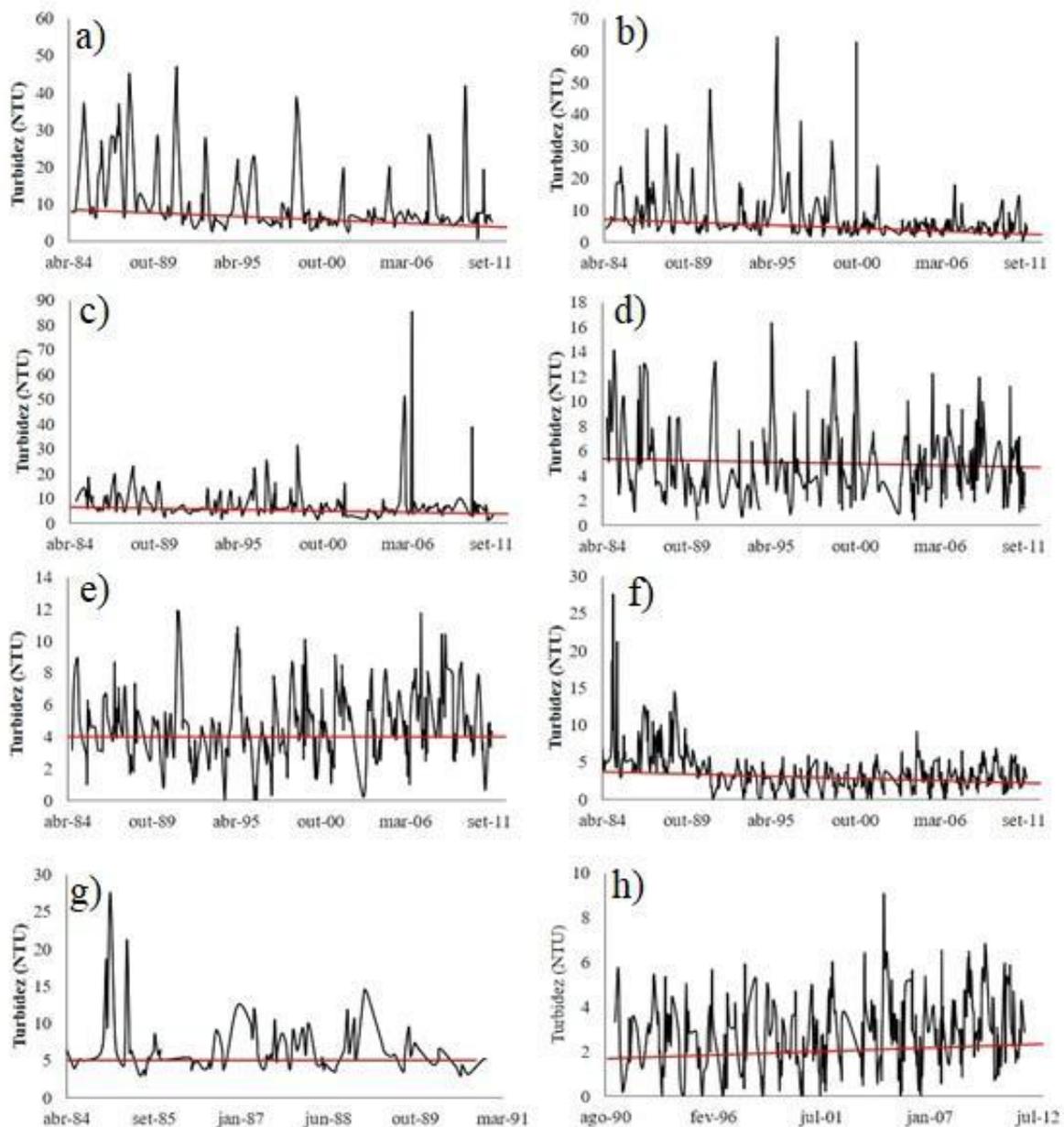


Figura 4: Séries temporais de turbidez para: a) Barra Bonita; b) Bariri; c) Ibitinga; d) Promissão; e) Nova Avanhandava; f) Três Irmãos (barramento na década de 1990); g) Três Irmãos pré-barramento; e h) Três Irmãos pós-barramento.

Com relação às comparações de medianas de turbidez entre os reservatórios, a maior parte delas demonstrou diferenças significativas, e três comparações resultaram em medianas iguais. Os resultados dos testes de mediana, a distribuição longitudinal dos reservatórios, bem como os diagramas de dispersão da turbidez estão resumidos na Figura 5. Os reservatórios de Barra Bonita e Bariri apresentaram diferença, em que houve diminuição para jusante. Nesse sentido - de montante para jusante - a turbidez estimada em Bariri foi menor do que a observada em Ibitinga, único caso de aumento para jusante. A diminuição da turbidez ainda foi observada entre Ibitinga e Promissão, e entre Nova Avanhandava e Três irmãos. Nos reservatórios de jusante,

ainda se observou inexistência de diferença significativa entre os reservatórios de Promissão e Nova Avanhandava. Portanto, no sentido de montante para jusante, comparando-se cada par de reservatórios em sequência, foram observadas três diminuições, um aumento e uma ausência de diferença.

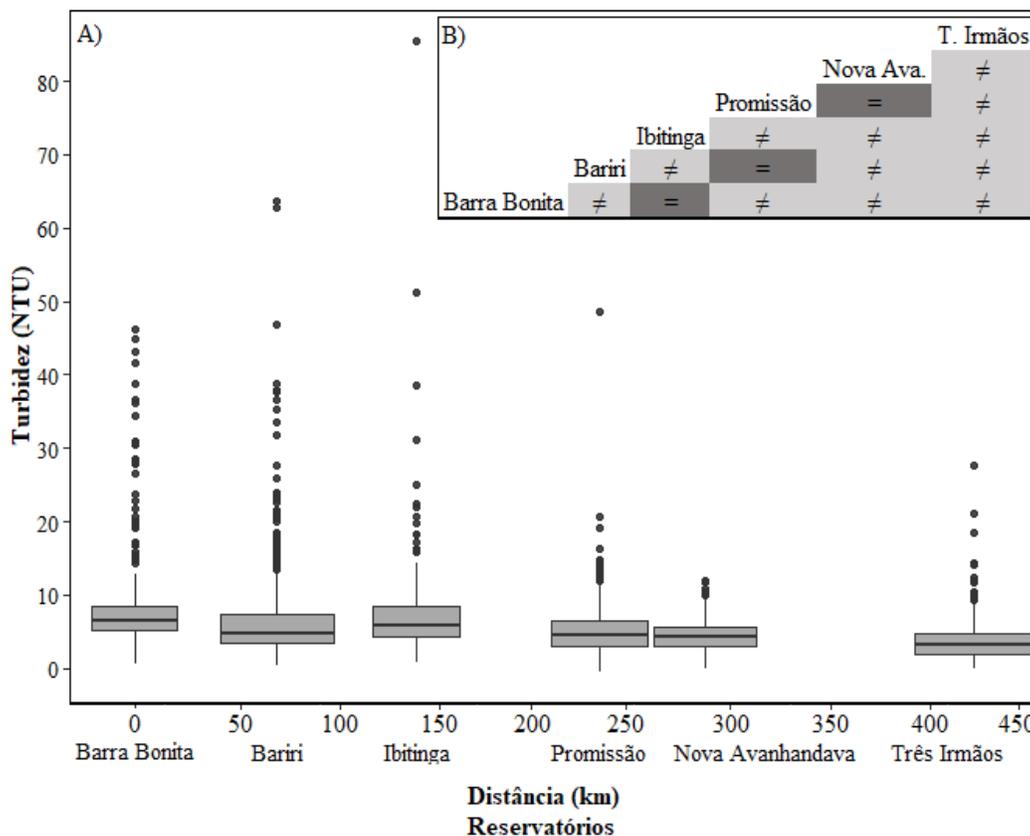


Figura 5: A) Gráficos de caixa das séries temporais de turbidez estimada para cada UHE, dispostos de montante à jusante. B) Matriz de correlação com a conclusão dos testes da mediana, em que '=' significa medianas semelhantes e '≠' medianas distintas.

Esses resultados mostram que a sequência de reservatórios em cascata não atua de modo a diminuir a turbidez de modo exatamente sistemático, ou seja, com redução da turbidez em certa taxa a cada barramento. O caso mais contrário a esse padrão geral é o reservatório de Ibitinga, que apresentou maior turbidez em relação a seu reservatório de montante. Mesmo assim, o padrão geral ainda é o de diminuição a jusante. A turbidez observada em Três Irmãos, por exemplo, foi inferior à turbidez observada em todos os outros reservatórios de montante (Figura 5). Portanto, pode-se afirmar que, embora o sistema de reservatórios cause a diminuição da turbidez a jusante, existem outros fatores que explicam a dinâmica da turbidez ao longo do rio Tietê.

Análise conjunta dos fatores

Os coeficientes angulares das retas ajustadas para as séries de turbidez, descritas na Tabela 3 - e que podem ser observadas graficamente na Figura 4 – foram tomados como uma variável dependente em um modelo de regressão múltipla, enquanto as variáveis distância longitudinal de cada reservatório e os coeficientes angulares relacionados às séries de pastagem são as variáveis preditoras. Os dados utilizados nessa análise estão descritos na Tabela 2, e os ajustes das retas para as séries de pastagem podem ser observados na Figura 6A.

Tabela 3: Dados utilizados na regressão múltipla. C.A. – Coeficiente Angular; D.L. – Distância longitudinal.

UHE	C.A.: Turbidez	C.A.: Pastagem	D.L. (km)
Barra Bonita	- 0,17160	-0,68138	0
Bariri	- 0,15480	-0,38058	60
Ibitinga	- 0,12850	-1,09556	134
Promissão	- 0,02473	-1,44521	242
Nova Avanhandava	0,03943	-2,02319	291
Três Irmãos - Pré	- 0,05765	-0,57073	426
Três Irmãos - Pós	0,07154	-1,30544	426

Observa-se nessa figura que a série temporal de pastagem para a bacia relativa ao reservatório de Três Irmãos foi dividida em duas, uma anterior ao barramento (1984-1991) e outra posterior (1992 – 2011). Isso foi feito para que os dados relativos às mudanças de pastagem nessa bacia fossem correspondentes com as tendências observadas nos dois períodos avaliados.

A regressão múltipla teve os seguintes resultados: valor-p (teste F): 0,0061, R^2 : 0,92 e R^2 ajustado: 0,88, com $n = 7$, e os coeficientes estão descritos na Tabela 2. A partir dos dados da Tabela 2, pode-se observar que as duas variáveis foram significativas, assim como o modelo geral (teste F). Também se denota a quantidade limitada de dados utilizados nessa modelagem via regressão. O total de sete casos deve-se ao fato de que existem seis barramentos, de modo que o último barramento ocorreu no intervalo temporal dos dados utilizados na pesquisa. Como o barramento causa uma diminuição intensa (Figura 7), transformando o sistema de modo estrutural, optou-se por dividir o período em pré e pós barramento, tanto na análise de tendências SK quanto nas séries de uso do solo. Esse desenvolvimento resultou em uma matriz composta por sete linhas, o que representa um conjunto pequeno de dados para afirmações mais concisas sobre os processos avaliados. No entanto, em termos estatísticos, houve evidência para rejeição das hipóteses nulas, tanto no que se refere aos

coeficientes individuais (testes t) quanto para o modelo como um todo (teste F). Além disso, a dispersão entre valores de tendência reais e estimados não demonstra não-linearidade e valores discrepantes, e apenas um ponto se encontra um pouco fora do intervalo no intervalo de 95% (Figura 6B).

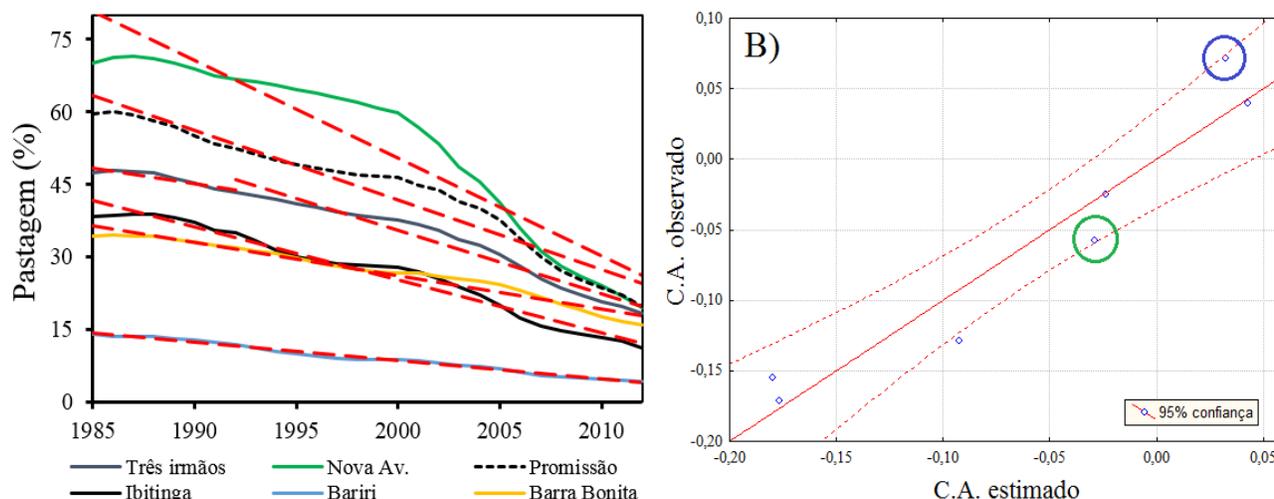


Figura 6: A) Porcentagem do uso do solo pastagem em cada sub-bacia, ao longo do tempo, e retas ajustadas; B) Dispersão entre valores, observados e estimados por meio de regressão múltipla, dos coeficientes angulares das retas ajustadas pelo método SK. Círculo verde: pré-barramento e círculo azul: pós-barramento Três Irmãos. C.A.: Coeficiente Angular.

A distância longitudinal tem uma contribuição um pouco maior do que a variação das pastagens, como demonstram os coeficientes normalizados (Tabela 4). O valor positivo do coeficiente relativo à distância longitudinal mostra que, quanto maior (menor) a distância a jusante, a tendência linear das séries de turbidez torna-se menos (mais) negativa. Esse resultado converge com os resultados observados no tópico 3.3, de que os reservatórios situados mais a montante tiveram tendências de diminuição mais proeminentes do que os reservatórios de jusante. É interessante notar que esse padrão se mantém com a inclusão da variável uso do solo na análise.

Tabela 4: Coeficientes da regressão múltipla.

Variável	Coefficiente normalizado	Coefficiente	Valor-p
β_0 : Intercepto	-	-0,233471	0,0013
β_1 : Pastagem	-0,504	-0,083654	0,0288
β_2 : Distância longitudinal	0,651	0,000368	0,0124

Com relação ao uso do solo, representado pelas séries temporais de pastagens nas sub-bacias, o coeficiente foi negativo (Tabela 4) e menor (em módulo) do que o coeficiente relativo à distância longitudinal.

Portanto, a distância longitudinal, e o respectivo efeito cumulativo dos barramentos na qualidade da água, apresentou maior relação com as tendências de turbidez do que as variações de uso do solo.

Como todas as retas ajustadas às pastagens possuem inclinações negativas, o coeficiente negativo da regressão demonstra que, quanto maior (menor) a diminuição de pastagens em uma determinada sub-bacia, a tendência linear das séries de turbidez torna-se menos (mais) negativa. Portanto, isso mostra que nas regiões com maiores reduções das áreas de pastagens, em grande parte transformadas em plantios de cana-de-açúcar, as séries de turbidez não apresentaram reduções ao longo do tempo em mesma medida quando comparadas com outras bacias, ou mesmo apresentaram tendências de aumento. Desse modo, é possível que o plantio de cana-de-açúcar esteja contribuindo com mais carga de sedimentos do que as áreas de pastagens. Nesse contexto, é interessante frisar que o efeito do uso do solo é menos importante quando comparado com o efeito longitudinal dos barramentos.

Ainda com relação ao caso do barramento de Três Irmãos, denota-se que, apesar de haver dados relativos a dois períodos, tanto de turbidez quanto de uso do solo, a distância longitudinal foi considerada a mesma, por se tratar do mesmo ponto do perfil. Essa condição possibilita uma análise interessante das estimativas do modelo de regressão múltipla, visto que nesse caso a diferença entre as estimativas refere-se apenas à diferença entre as dinâmicas de uso do solo dos dois períodos. As tendências lineares observadas de turbidez para esses dois períodos foram de -0,057 (pré) e 0,071 (pós), enquanto os valores estimados: -0,029 (pré) e 0,032 (pós). Portanto, ao menos nesses dois casos, o uso da variável uso do solo no modelo (simplificada pela série de dados de pastagens), foi capaz de determinar corretamente o sentido das retas e demonstrar alguma diferença de magnitude entre elas. Para facilitar a visualização, os pontos mencionados estão demarcados na Figura 6B.

Turbidez pré e pós-barramento Três Irmãos

As séries de turbidez para a UHE Três Irmãos estão resumidas na Figura 7 com distinção dos períodos pré e pós-barragem. É notável que enquanto o sistema era lóxico a mediana, bem como a distribuição central (quartis de 25% a 75%) eram maiores, com pronunciada diminuição posteriormente à construção do barramento. Adicionalmente, observou-se diminuição da variabilidade entre os períodos, em que após o barramento nota-se uma menor distância interquartil, bem como diminuição da ocorrência de valores discrepantes.

As seguintes médias e desvio-padrão dos dois períodos foram obtidas: $6,49 \pm 3,67$ NTU (pré), e $2,77 \pm 1,6$ NTU (pós). Verificou-se a validade estatística dessas diferenças por meio do teste F, para variâncias, e do teste-t para diferença de médias (unilateral). Houve evidências para rejeitar ambas hipóteses nulas, de igualdade de variâncias e de igualdade de médias (valor- $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$ para os dois testes).

A diminuição da média e da variabilidade da turbidez no rio Tietê após o barramento de Três Irmãos é similar ao observado em séries de concentração de sedimentos suspensos para o rio Paraná, mais especificamente após a conclusão do reservatório de Porto Primavera, no ano de 1998 (MONTANHER e SOUZA FILHO, 2015). De fato, a quantidade de sedimentos suspensos que tem sido retida à montante de reservatórios ao longo da bacia do rio Paraná é expressiva, e a taxa de retenção modificou-se rapidamente na segunda metade do século XX. Comparando-se dados obtidos em aproximadamente 30 anos, Amsler e Drago (2009) relataram uma diminuição de 60% na carga de sedimentos suspensos transportados pelo rio Paraná nas proximidades com a confluência com o rio Paraguai, na Argentina.

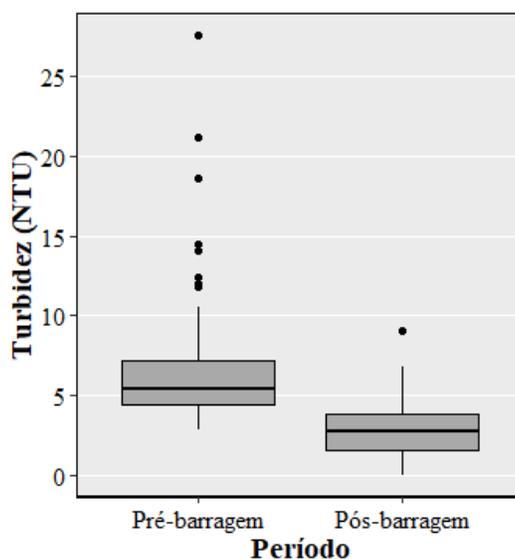


Figura 7: Turbidez estimada para a UHE de Três Irmãos nos períodos pré e pós-barramento.

O período avaliado por Amsler e Drago (2009), entre a década de 1970 e o final da década de 1990, foi caracterizado pela construção de um grande número de empreendimentos no segmento da bacia do rio Paraná em território brasileiro, como a Usina Hidrelétrica de Itaipu. Esses autores ainda mencionam que mesmo com as mudanças observadas no uso do solo e no ciclo hidrológico dessa bacia, que poderiam aumentar a erosão e o transporte de sedimentos no canal principal, a retenção de sedimentos pelas barragens suplantou tais efeitos. Os resultados reportados neste artigo corroboram quantitativamente com a afirmação de Amsler e Drago (2009).

Quando avaliado em escala global, o aumento da quantidade de barragens e seus efeitos sobre os canais fluviais coincide em parte com o cenário brasileiro. Anteriormente à década de 1950 o efeito de retenção das barragens alterou-se, de quase inexpressivo, para entre 25% e 30% de todo o volume de sedimentos transportado pelos rios do mundo (WALLING, 2012). Em escala global esses barramentos foram construídos principalmente nas décadas de 1960 a 1980, atingindo aproximadamente 50% de todos os rios do mundo (WALLING, 2012).

IV. CONCLUSÃO

Essa pesquisa permite obter as seguintes conclusões: i) Os modelos que apresentaram as estimativas mais precisas, e com menor complexidade, foram distinguidos em duas regiões (alto e baixo Tietê), mas sem distinção sazonal; ii) De forma geral, os barramentos causaram retenção de sedimentos, visto que as séries situadas mais a montante apresentam valores maiores, bem como maior variabilidade. Adicionalmente, nos reservatórios de montante também se constatou tendências de diminuição, no decorrer do tempo, mais pronunciadas em relação aos demais.

iii) Tanto os barramentos, representados por suas distâncias longitudinais, quanto o uso do solo, representado pela variação de área das pastagens nas bacias, foram variáveis significativas na análise de regressão múltipla. No entanto, os barramentos tiveram uma importância um pouco maior para explicação das tendências do que a transformação de pastagens para cana-de-açúcar. Quanto maior a distância a jusante, as tendências temporais tornam-se menos negativas, e quanto maiores as diminuições de pastagens nas bacias, as tendências também se tornam menos negativas. iv) O barramento da UHE de Três Irmãos provocou uma diminuição pronunciada da turbidez, tanto da média quanto de sua variabilidade, quando comparadas as séries de dados pré e pós barramento. Como esse foi o único reservatório cuja construção se encerrou no período compreendido pela série temporal analisada, foi possível avaliar diretamente seus efeitos sobre a turbidez.

V. REFERÊNCIAS

- AMSLER, M.J.; DRAGO, E.C. A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers. *Hydrological Processes*, v. 23, p. 3230–3235, 2009.
- BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações*. 1ª edição. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019. 161 p.
- BERNARDO, N.; CARMO, A.; PARK, E.; ALCÂNTARA, E. Retrieval of Suspended Particulate Matter in Inland Waters with Widely Differing Optical Properties Using a Semi-Analytical Scheme. *Remote Sensing*, v. 11, p. 1-22, 2019.
- CARVALHO, F.T.; VELINI, E.D.; CAVENAGHI, A.L.; NEGRISOLI, E.; CASTRO, R.M. Influência da turbidez da água do rio tietê na ocorrência de plantas aquáticas. *Planta Daninha*, v. 23, p. 359-362, 2005.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. *Publicações e Relatórios de Águas Interiores*. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios>>. Acesso em: 28 de abril de 2020.
- CREMON, E.H.; SILVA, A.M.; MONTANHER, O.C. Estimating the suspended sediment concentration from TM/Landsat-5 images for the Araguaia River - Brazil. *Remote Sensing Letters*, v. 11, p. 47-56, 2020.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Remote Sensing of Environment Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.
- HELSEL, D.R.; HIRSH, R.M. 2002. Trend Analysis. In: D.R. Helsel and R.M. Hirsch, eds. *Statistical methods in water resources* [online]. United States Geological Survey, p. 323–355. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/twri/twri4a3/pdf/twri4a3-new.pdf>.
- HELSEL, R.D.; FRANS, L.M. Regional Kendall Test for Trend. *Environmental Science & Technology*, v. 40, p. 4066–4073, 2006.
- LATRUBESSE, E.M. et al. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, v. 546, p. 363-369, 2017.
- LELI, I.T.; STEVAUX, J.C.; NÓBREGA, M.T. Produção e transporte da carga suspensa fluvial: teoria e método para rios de médio porte. *Boletim de Geografia, Maringá*. v. 28, p. 43-58, 2010.
- MAPBIOMAS - Mapbiomas Brasil. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 14 de outubro de 2020.
- MONTANHER, O.C.; SOUZA FILHO, E.E. Estimating the suspended sediment concentration in the upper Paraná river using Landsat 5 data: data retrieval on large temporal scale and analysis of the effects of damming. *Geografia, Rio Claro*, v. 40, p. 159-176, 2015.
- RONQUIM, C.C.; FONSECA, M.F. Avanço das áreas de cana-de-açúcar e alterações em áreas de agropecuária no interior paulista. *Embrapa Territorial-Documentos (INFOTECA-E)*, Campinas, 48 pp. 2018.
- SILVA, R.B.L.; MONTANHER, O.C. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TENDÊNCIAS TEMPORAIS DA REFLECTÂNCIA SUPERFICIAL DO RESERVATÓRIO TRÊS IRMÃOS/SP, RIO TIETÊ: ANÁLISES COM USO DE IMAGENS LANDSAT 5.. In: *Anais Eletrônico do XI EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica*. Anais...Maringá (PR) UNICESUMAR, 2019. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/epcc2019/188105-DISTRIBUICAO-ESPACIAL-E-TENDENCIAS-TEMPORAIS-DA-REFLECTANCIA-SUPERFICIAL-DO-RESERVATORIO-TRES-IRMAOSSP-RIO-TIET>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

STEVAUX, J.C.; MARTINS, D.P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 113, p. 230-238, 2009.

WALLING, D.E. The role of dams in the global sediment budget. In: *EROSION AND SEDIMENT YIELDS IN THE CHANGING ENVIRONMENT*, Chengdu (China): IAHS Publ. 356, 11-15 Outubro 2012, p. 3-11.

WALLING, D.E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*. v. 39. p. 111-126, 2003.
