

Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida

Everton Alves Rodrigues Pinheiro¹, José Carlos de Araújo²,
Sávio de Brito Fontenele² & José Wellington Batista Lopes²

Protocol 12.2013 - Received: 19/03/2013 - Accepted: 26/07/2013

Resumo: Nos dias de hoje um dos maiores desafios dos estudos sedimentológicos é entender o padrão de variabilidade temporal da concentração de sedimentos suspensos. Portanto, objetiva-se com esta pesquisa calibrar um turbidímetro por meio da ressuspensão de sedimentos, analisar a confiabilidade das estimativas da concentração de sedimentos suspensos e avaliar a dinâmica sedimentológica de uma seção do Rio Umbuzeiro, Ceará. Os principais resultados revelam que o método de calibração por meio da ressuspensão de sedimentos gerou uma equação representativa para as estimativas dos sedimentos suspensos da seção em estudo; a análise de confiabilidade mostrou que a concentração de sedimentos suspensos, estimada pelo turbidímetro é confiável até a faixa de turbidez de 409 NTU, decrescendo em seguida e apresentando baixa confiabilidade para as medidas de turbidez acima de 689 NTU; a produção de sedimentos no rio estimada pela curva-chave foi o dobro daquela estimada pelo método da turbidez.

Palavras-chave: monitoramento hidrológico, turbidez, retenção de sedimentos

Turbidimeter calibration and reliability analysis of the estimation for suspended sediment at a semiarid watershed

Abstract: One of the biggest challenges of the sedimentological studies is to understand the temporal variability pattern of suspended sediment concentration. Therefore, this study aimed to calibrate a turbidimeter by the re-suspension of sediments, to analyse the reliability of the estimation of suspended sediments concentration and to evaluate the sedimentological dynamics in a section of the Umbuzeiro River, Ceará, Brazil. The results showed that the calibration method by re-suspension of the sediments generated a representative equation for the estimation of the suspended sediments in the studied section. The reliability analysis showed that the concentration of suspended sediments estimated by the turbidimeter is reliable up to the turbidity of 409 NTU and a low reliability for measurements of turbidity above 689 NTU; the sediment yield in the river estimated by rating curve was twice the estimated by turbidity method.

Key words: hydrologic monitoring, turbidity, sediment retention

¹ ESALQ/USP. CEP 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: evertonvest@yahoo.com.br

² DENA/UFC. CEP 60020-181, Fortaleza, CE. E-mail: jcaraujo@ufc.br; savio.fontenele@hotmail.com; wellingtonjwl@gmail.com

Introdução

Nos dias de hoje um dos maiores desafios dos estudos sedimentológicos é entender o padrão de variabilidade espacial e temporal da Concentração de Sedimentos Suspensos (CSS) em rios e os processos que governam a exportação de nutrientes, morfologia dos rios, assoreamento de reservatórios e degradação da qualidade da água (Navratil et al., 2011). Portanto, melhorar a resolução temporal das medidas de CSS é imprescindível para as investigações sedimentológicas, principalmente para as condições semiáridas, onde os eventos de escoamento superficial são raros e geralmente efêmeros.

O fluxo anual de sedimentos suspensos ocorre em uma porcentagem muito pequena de tempo, correspondendo aos eventos responsáveis pelos picos elevados de vazão. Mano et al. (2009) mostram que entre 40-80% do fluxo anual de sedimentos suspensos ocorrem dentro de 2% do tempo. De acordo com Wren et al. (2000), mais de 50% dos sedimentos transportados pelos rios ocorrem durante os grandes eventos de cheias, fluxos esses que normalmente, acontecem à noite, dificultando predizer o horário. Lima Neto et al. (2011) mostram que aproximadamente 75% dos sedimentos produzidos na Bacia do Alto Jaguaribe entre 1984 e 2009 ocorreram apenas em um ano (2004). Em geral, há uma perda considerável de dados, pelo monitoramento sedimentológico tradicional visto que os grandes eventos de vazões raramente são contemplados com medidas. Já os métodos automáticos conseguem representar, com maior fidelidade, a dinâmica sedimentológica nos diferentes níveis de descarga líquida, aumentando, desta forma, a confiabilidade das séries de monitoramento.

De modo geral, não há uma metodologia ideal para a mensuração da CSS, mas as estimativas indiretas através da turbidez ganharam aceitação dentre os vários métodos de monitoramento, devido, principalmente, à dificuldade de se obter medidas diretas em alta resolução temporal. Quando não há limitação de recursos, mas existe uma logística para obtenção das medidas *in situ*, as medições diretas são bastante empregadas apesar de produzirem uma série de dados intermitentes, oriunda de uma árdua mão-de-obra envolvida em todas as fases (Francke et al., 2008). Por outro lado, as estimativas com turbidímetros, além de melhorarem a resolução das leituras, constituem-se em um

método de fácil monitoramento, passível de ser aplicado com certa facilidade, em seções sedimentológicas (Morris & Fan, 1997; Old et al., 2003; López-Tarazón et al., 2009; Mano et al., 2009). Porém, as medidas diretas (tradicionais) de CSS permanecem ainda como referência na calibração e no ajuste de outros métodos (Wren et al., 2000).

De acordo com Minella et al. (2008), são dois os métodos de calibração de turbidímetros aplicados com maior frequência. O primeiro consiste na correlação de medidas de turbidez com amostras de CSS coletadas no momento em que as sondas registram as leituras. Para este método, recomenda-se que as amostras de CSS sejam coletadas pelo método do igual incremento de largura (IIL) (Carvalho, 2008). Assim se associa uma amostra composta de vazão sólida da seção com a leitura de turbidez da sonda, enquanto o segundo método consiste em se coletar amostras de solo de diferentes áreas da bacia, aquelas mais representativas, preparando concentrações conhecidas, correlacionando-as com as leituras de turbidez da sonda. O primeiro método é o mais indicado visto que o segundo incorpora erros significativos na curva de calibração por não representar com fidelidade os sedimentos que passam na seção.

É fato que o transporte e a deposição de sedimentos são questões ambientais que podem afetar seriamente a sociedade, como demonstrado por Araújo et al. (2006), que ao avaliarem o impacto do assoreamento nos reservatórios do Estado do Ceará, mostraram que a vazão regularizável com 90% de garantia decai cerca de 388 L s⁻¹ todo ano, somente em virtude da deposição de sedimentos. Desse modo, compreender a dinâmica sedimentológica de uma bacia hidrográfica é de grande relevância para o refinamento e entendimento dos processos locais, a fim de gerar resultados com implicação direta na política de planejamento. Objetiva-se, portanto, neste trabalho: calibrar um turbidímetro por meio da ressuspensão de sedimentos; avaliar a confiabilidade das estimativas feitas pela curva de calibração em diferentes faixas de turbidez e avaliar a dinâmica sedimentológica na escala de evento.

Material e Métodos

A seção de monitoramento hidrossedimentológico, denominada seção da Aroeira, está localizada no Rio Umbuzeiro, município de Aiuaba, Ceará. A seção de

monitoramento localiza-se no rio principal da Bacia do Açude Benguê (21,7 hm³) cuja localização exata em coordenadas UTM (Zona 24S, SAD-69 datum) é 9.265.948 UTM e 363.840 UTM. A seção foi instalada em 2012 e monitora uma área de captação de 800 km². Na Figura 1 é indicada a bacia do Açude Benguê aninhada com a Bacia do Rio Jaguaribe (BRJ). Os aparelhos componentes da seção são: um turbidímetro, um sensor de nível de pressão e um pluviógrafo; todos estes aparelhos estão conectados a um datalogger externo.

Para as condições semiáridas, onde os eventos de escoamento superficial são raros, há uma grande dificuldade de se calibrar um turbidímetro por meio da correlação entre medidas de turbidez e descarga sólida da seção, durante eventos de escoamento. Raramente se obterá uma curva de calibração representativa em um único ano hidrológico, diante disso, esta pesquisa usou um método de calibração baseado na ressuspensão de sedimentos. A seção de monitoramento foi estrategicamente instalada em uma passagem molhada, onde há a formação de um pequeno lago com capacidade de armazenamento de 6000 m³ (Figura 1). Assim, a calibração se consistiu em coletar amostras de sedimento retidas no lago.

A coleta se deu por meio da ressuspensão do material fino obtendo-se uma amostra de água com elevada CSS. Adotou-se a hipótese de que o material presente na amostra seja representativo de toda a bacia, pois os sedimentos depositados no fundo do lago são compostos por material de diferentes anos hidrológicos.

A amostra hiperconcentrada coletada no lago foi diluída em várias amostras de diferentes valores de CSS. Para cada amostra a sonda (DTS-12) efetuou cinco leituras de turbidez em unidades nefelométricas de turbidez (NTU); permitindo a obtenção de média e desvio-padrão das leituras de turbidez para cada concentração, as repetições foram tomadas no intervalo de tempo de 1 minuto. A primeira solução foi a água pura; as demais soluções, no total de seis, foram adquiridas com o aumento da CSS. As concentrações em que a sonda efetuou as leituras foram acondicionadas em garrafas plásticas e encaminhadas para laboratório, onde a CSS foi medida. Na Figura 2 são destacadas as amostras em que as leituras de turbidez foram efetuadas; percebe-se, pelo contraste de cores, a amplitude das concentrações.

Após a confecção da curva de calibração foi procedida uma análise de confiabilidade da

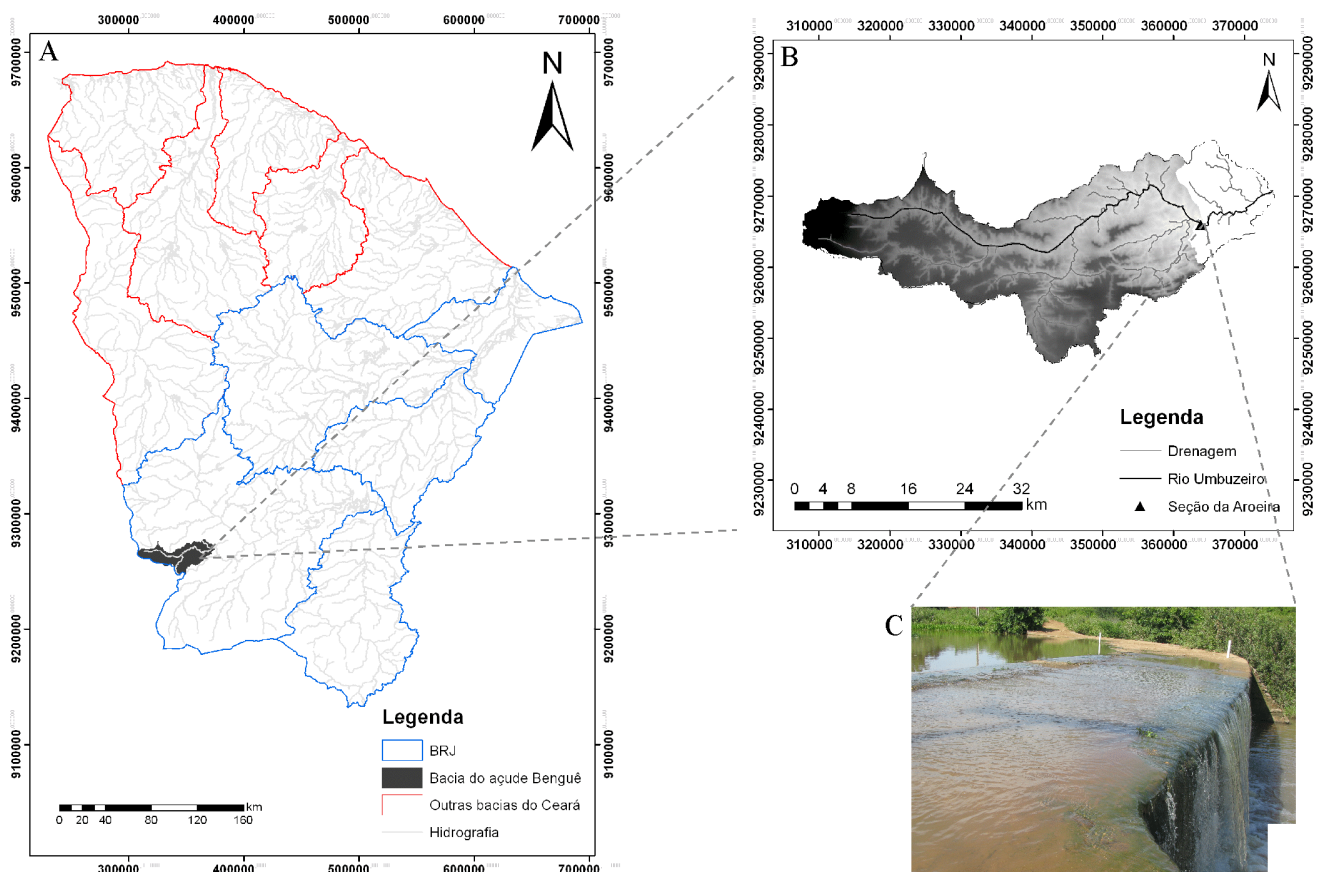


Figura 1. Bacia do Rio Jaguaribe, BRJ (A), aninhada com a Bacia monitorada pela seção da Aroeira (B) mostrando-se no detalhe a passagem molhada (formação de um pequeno lago), local de instalação do instrumental (C)

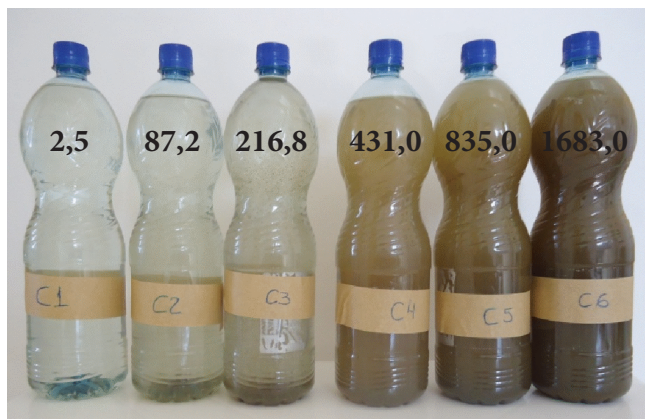


Figura 2. Amostras com diferentes concentrações (mg L^{-1}) de sedimento suspenso para a calibração do turbidímetro

equação de calibração do turbidímetro para diferentes faixas de turbidez. A análise foi efetuada através do método de simulação de Monte Carlo (Chow et al., 1988; Singh, 2006; Silva, 2010). A partir da média e do desvio das leituras de turbidez registradas para cada amostra de CSS, foram geradas seis séries sintéticas de turbidez com 1000 simulações cada uma. Os valores de média e desvio-padrão da série sintética convergiram com os da série medida (Eq. 1). As séries sintéticas de turbidez foram aplicadas na equação de calibração, com 95% de intervalos de confiança.

$$X = \mu + \sigma \times z \quad (1)$$

em que:

X - valor sintético de turbidez

μ - média da turbidez medida para cada concentração

σ - desvio-padrão da turbidez para cada concentração

z - variável normal padrão (calculada com base na função densidade de probabilidade)

Fez-se uma análise da dinâmica da CSS dentro do lago, avaliando-se o comportamento desta variável na fase de enchimento e depleção do lago. Com o propósito de identificar a influência do lago na retenção de sedimentos, foi calculada a taxa média de redução da CSS (deposição) nas diferentes fases do lago. O intervalo de tempo considerado no cálculo da taxa de redução da CSS na fase de enchimento foi aquele compreendido entre o início da elevação do nível da água do lago até o início do seu rebaixamento. Quando a primeira leitura do linígrafo registrou rebaixamento do nível, assumiu-se que as próximas variações da CSS pertenciam à fase de depleção; a fase de depleção foi acompanhada até a CSS tender a um valor constante.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta a turbidez média e a CSS correspondente às amostras para as quais se traçou a curva de calibração do turbidímetro (Figura 3).

Tabela 1. Turbidez e concentração de sedimentos suspensos (CSS) das amostras usadas na calibração do turbidímetro

Concentrações (C)	Turbidez média (NTU)	CSS (mg L^{-1})
Água Pura	1,43	0,0
C1	21,43	2,5
C2	113,94	87,2
C3	251,77	216,8
C4	408,54	431,0
C5	689,31	835,0
C6	1389,40	1683,0

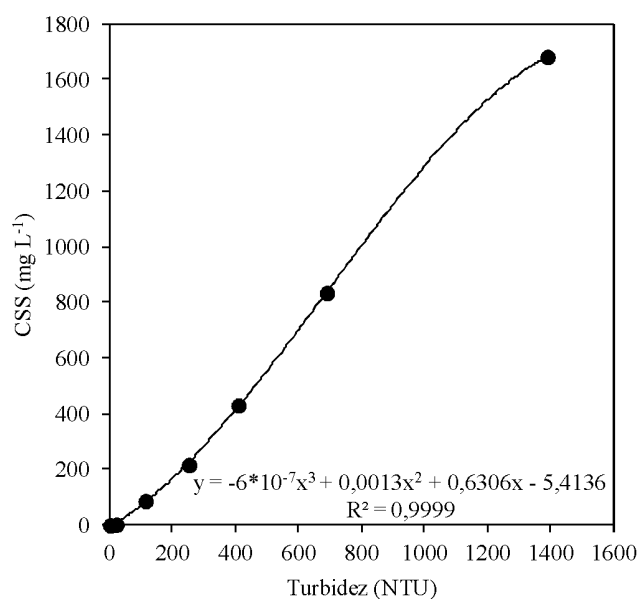


Figura 3. Curva de calibração do turbidímetro para a seção em estudo

Houve correlação significativa entre as medidas de CSS e a turbidez, tendo a curva se ajustado à equação polinomial de terceiro grau. Navratil et al. (2011) encontraram o melhor ajuste da curva de calibração com a equação potencial, porém para a seção da Aroeira a equação potencial não representa os valores de turbidez abaixo de 40 NTU; já a polinomial estima a CSS para valores de turbidez mínimos de 8 NTU. Ao aplicar a turbidez de uma amostra composta de CSS coletada na seção da Aroeira pelo método de igual incremento de largura (IIL) na equação de calibração, observou-se uma superestimativa de apenas 6%. A princípio, dada a elevada variação das medidas da CSS pelos diferentes métodos de estimativa, a equação fornecida pela calibração tem boa representatividade para os sedimentos suspensos da seção em estudo.

Para o ano hidrológico de 2012, a precipitação acumulada foi de 330 mm (redução de 41% em relação à média histórica do município de Aiuaba, CE) produzindo um volume escoado de apenas 3,1 hm³. O baixo volume escoado adveio da distribuição irregular das chuvas, em que 32% do total acumulado aconteceram no período de três dias do mês de janeiro (107 mm) momento em que o solo se encontrava com baixo conteúdo de água (alta abstração), só voltando a chover com maior expressividade nos últimos sete dias do mês de março (118 mm), 36% do acumulado. Este comportamento caracterizou o ano de 2012 como um dos mais secos da história recente, havendo apenas dois eventos de escoamento superficial de magnitudes semelhantes, com pico de descarga da ordem de 7,5 m³ s⁻¹. Diante da baixa frequência dos eventos naturais para as regiões semiáridas (Zhu et al., 2002), construir uma série de medidas de CSS representativas de uma seção acompanhando o rio em diferentes níveis, é uma tarefa árdua, dificultando enormemente a obtenção de curvas de calibração de turbidímetros pela correlação entre amostras compostas de descarga sólida em suspensão e turbidez. Portanto, a ressuspensão surge como alternativa plausível na calibração de turbidímetros instalados em seções de rios semiáridos.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de confiabilidade da equação de calibração para diversas faixas de turbidez. Para as leituras de turbidez abaixo de 409 NTU foi notória elevada confiabilidade nas estimativas da CSS, ou seja, os intervalos de confiança entre as concentrações máximas e mínimas são pequenos, apresentando desvio-padrão máximo de 16 mg L⁻¹, porém para os valores de turbidez acima de 689 NTU a confiabilidade foi reduzida significativamente apresentando intervalos de confiança com elevada amplitude e desvio-padrão máximo de 181 mg L⁻¹.

O comportamento das estimativas da CSS a partir da equação de calibração se deve principalmente aos desvios padrões das medidas de turbidez. Até a quarta concentração (409

NTU), os desvios foram pequenos havendo pouca variabilidade nas medidas de turbidez. Já para as elevadas concentrações (C5 e C6) os desvios foram significativamente elevados, provavelmente advindos de limitações da sonda. Deste modo, as estimativas da CSS da seção em estudo através das medidas de turbidez, apresentam maior grau de confiabilidade para as concentrações de até 409 NTU; acima deste valor a alta variabilidade nas leituras de turbidez diminui significativamente a confiabilidade das estimativas da CSS. Navratil et al. (2011) mostram que a distribuição das incertezas da equação de calibração é oriunda, sobremaneira, da variável de entrada (turbidez). Para a seção em estudo constatou-se que a turbidez máxima registrada foi de 513 NTU (CSS de 580 mg L⁻¹) na fase de enchimento do lago enquanto a turbidez máxima registrada na fase de vertimento do lago foi de 431 NTU (CSS de 461 mg L⁻¹). De modo geral, para os valores de turbidez registrados na seção a curva de calibração tem potencial de estimar a CSS com bastante confiabilidade.

Na Figura 4A é mostrada a variação horária da CSS estimada pela sonda para um evento de escoamento superficial que ocorreu entre os dias 22 e 28 de janeiro de 2012. Observa-se que nos segundo e terceiro dias há uma considerável variação da CSS em que, pelo método tradicional de medição, geralmente procedido uma única vez ao dia, não se conseguiria identificar este comportamento. A variação da CSS acompanhou a variação de vazão líquida da seção visto que para as descargas líquidas mínimas a variação da CSS foi praticamente nula. Silva et al. (2011), ao correlacionarem a CSS com a descarga líquida de uma bacia semiárida, também registraram elevada variação. De acordo com Minella et al. (2011), a relação entre vazão líquida e CSS apresenta padrões temporais complexos em virtude, sobretudo, dos fatores de distribuição da precipitação, geomorfologia, uso e manejo do solo. Portanto, a possibilidade de melhorar a resolução temporal das estimativas de CSS na escala de evento melhora, de forma significativa, a acurácia das estimativas, o que permite avançar no entendimento da dinâmica sedimentológica de uma bacia (Morris & Fan, 1997; Mano et al., 2009). Na Figura 4B são apresentados o hidrograma e o sedimentograma do evento analisado.

Ainda para o evento em questão, são apresentados na Figura 5 o comportamento da CSS e sua taxa de redução (deposição) nas fases de enchimento e depleção do lago. A fase de elevação

Tabela 2. Análise de confiabilidade da equação de calibração na estimativa da concentração de sedimentos suspensos para diferentes valores de turbidez

Conc.	Turbidez (NTU)		CSS (mg L ⁻¹)			
	Média	Desvio	Média	Desvio	Máximo	Mínimo
C1	21,4	2,61	8,6	1,7	12,1	5,0
C2	113,5	0,31	82,4	0,3	83,0	81,8
C3	251,8	9,90	226,5	11,3	249,3	203,7
C4	408,5	11,41	428,7	16,1	459,7	397,7
C5	689,3	91,51	852,5	143,3	1129,6	575,4
C6	1389,4	239,3	1700,0	180,9	2072,9	1328,9

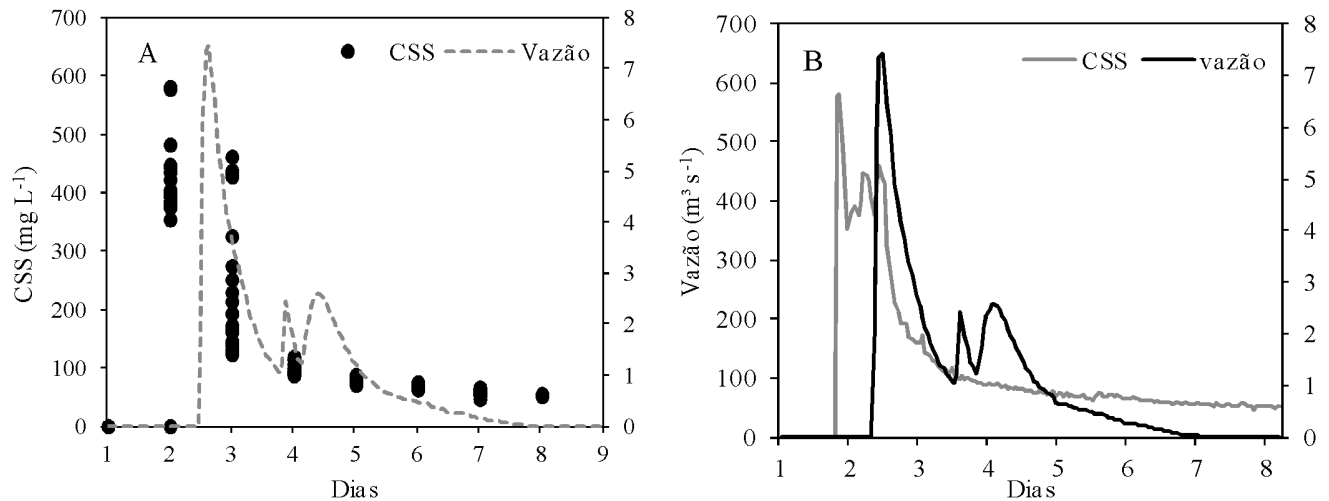


Figura 4. Variação horária da concentração de sedimentos suspensos (CSS) estimada pelas medidas de turbidez (A), hidrograma e sedimentograma do evento dos dias 22-28 de janeiro de 2012 (B). O sedimentograma foi construído a partir do início do enchimento do lago

do nível do lago teve duração de 12 h; nesta fase a CSS atingiu os valores máximos devido à chegada da primeira onda de cheia. A CSS média do intervalo foi de 438 mg L^{-1} , porém, ainda nesta fase se deu início ao processo de deposição de sedimentos ocorrendo a uma taxa média de 9,5%. A duração da fase de depleção do lago, período considerado entre o início do rebaixamento do nível até a CSS atingir um valor constante, foi de 168 h. A CSS média do período foi de 62 mg L^{-1} , sendo que o valor foi estabilizado em 16 mg L^{-1} . A taxa de deposição média foi de 5,7%.

O comportamento da CSS no lago evidencia a importância dos reservatórios na retenção de sedimentos, uma vez que a concentração máxima em geral fica retida, proporcionando um amortecimento da CSS, ou seja, a quantidade de sedimento entregue na jusante do reservatório é quase sempre inferior ao potencial de produção

da bacia. Xu & Milliman (2009) estimam que 60% dos sedimentos do Rio Yangtze ficam retidos na barragem das Três Gargantas, a maior do mundo, localizada na China; no entanto, a pequena açudagem também possui grande potencial de retenção de sedimentos atuando na distribuição deste na bacia hidrográfica. Malveira et al. (2012) mostram a existência de uma densa rede de reservatórios para a Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ), atuando principalmente na quebra de conectividade entre os canais secundários com a calha principal do rio. Lima Neto et al. (2011) corroboram e ratificam o impacto dessa densa rede de reservatórios, estimando uma retenção de aproximadamente 61% dos sedimentos produzidos na BAJ. Esta retenção exerce forte impacto na geomorfologia de uma bacia, visto que reduz a produção de sedimento em grandes áreas, em razão, principalmente, da retenção

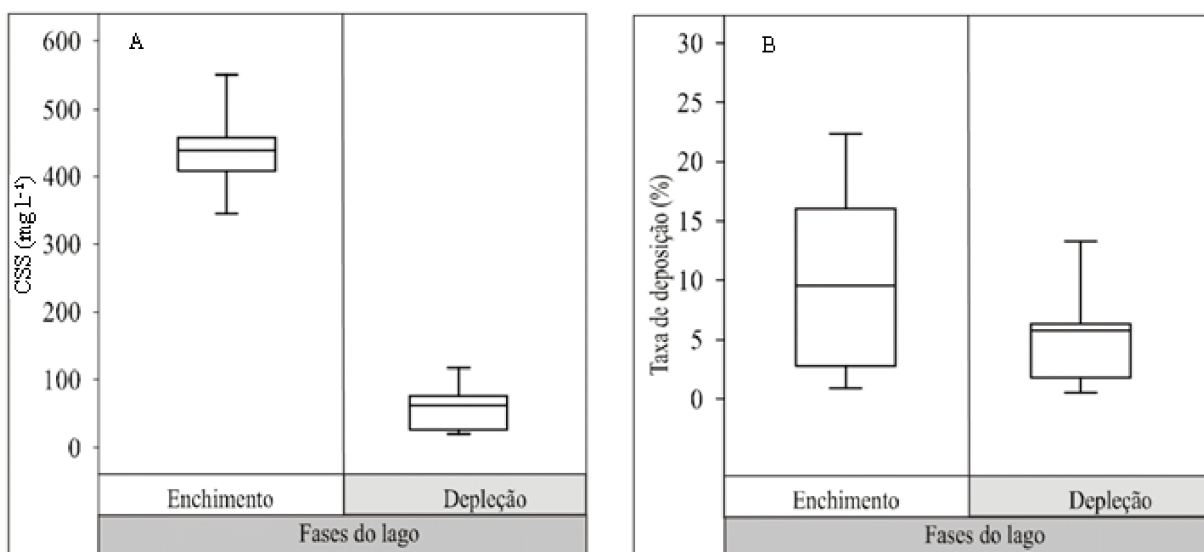


Figura 5. Variação da concentração de sedimentos suspensos (CSS) e da taxa de deposição de sedimento durante as fases de enchimento e depleção do lago da seção da Aroeira

direta de sedimento e a redução dos picos de descarga.

A produção de sedimento (Y_s) da área monitorada foi estimada de duas maneiras: aplicando-se a curva-chave de sedimento da seção e por meio da CSS estimada pela turbidez. A Figura 6 mostra o comportamento da descarga horária de sedimento suspenso (Q_{ss}) estimada pelos dois métodos.

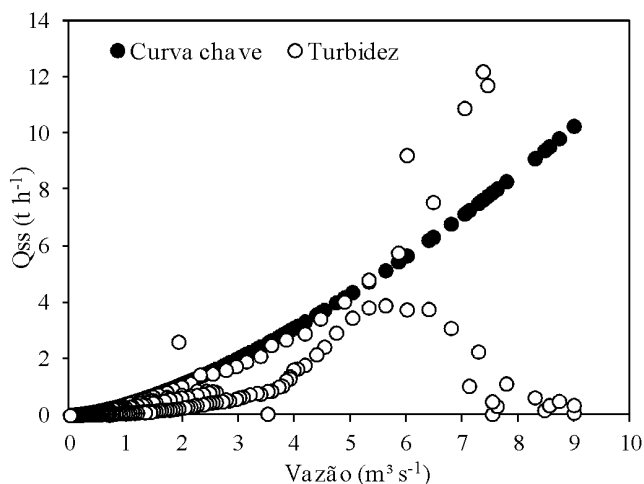


Figura 6. Descarga horária de sedimento suspenso estimada pela curva-chave sedimentológica e pela turbidez

Apesar de Cánton et al. (2001) destacarem que anos secos não são representativos para o cálculo da produção de sedimento, a Y_s do ano de 2012 da seção em estudo foi estimada com a finalidade única de se comparar os métodos (curva-chave e turbidez). Pelo método da curva-chave a Y_s foi estimada em $0,48 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ enquanto pela turbidez a Y_s foi estimada em $0,24 \text{ t km}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, uma diferença de exatamente 100%. De acordo com Carvalho et al. (2000), as curvas-chave de sedimento comumente possuem a forma de potência, formato da curva da seção da Aroeira; ante este fato observa-se, na Figura 6, que a Q_{ss} apresenta uma tendência sempre crescente com o aumento da vazão líquida, podendo superestimar a Y_s . Por outro lado, observa-se pelo método da turbidez, um decaimento da Q_{ss} mesmo para valores máximos de vazão, devido, provavelmente, à não coincidência entre os picos de vazão sólida e líquida, como mostrado na Figura 4B. De acordo com Mano et al. (2009), é justamente essa capacidade de melhorar a escala temporal das estimativas da variação da CSS dentro de um evento que faz da turbidez um método capaz de captar as nuances do comportamento sedimentológico, visto que, normalmente, os métodos tradicionais são incapazes de representá-las.

Conclusões

1. O método de calibração do turbidímetro por meio da ressuspensão de sedimentos gerou uma equação representativa para a estimativa da concentração de sedimentos suspensos da seção estudada.

2. A análise de confiabilidade mostrou que a concentração de sedimentos suspensos, estimada pelo turbidímetro, é confiável até a faixa de turbidez de 409 NTU, decrescendo em seguida e apresentando baixa confiabilidade para as medidas de turbidez acima de 689 NTU.

3. O lago desempenhou influência significativa na retenção de sedimentos, reduzindo a concentração de sedimentos suspensos entregue a jusante.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor e também ao projeto SESAM (Sediment Export from Large Semi-Arid Catchments: Measurement and Modelling) pelo suporte fornecido a esta pesquisa.

Literatura Citada

- Araújo, J. C.; Güntner, A.; Bronstert A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v.51, p.156-170, 2006.
- Cánton, Y.; Domingo, F.; Solé-Benet, A.; Puigdefábregas, J. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, v.252, p.64-84, 2001.
- Carvalho, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.
- Carvalho, N. O.; Júnior, N. P. F.; Santos, P. M. C.; Lima, J. E. F. W. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000. 154p.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. *Applied hydrology*. McGraw Hill International Editions. Singapura: Civil Engineering Series, 1988. 572p.
- Francke, T.; López-Tarazón, J. A.; Schröder, B. Estimation of suspended sediment concentration and yield using linear models, random forests and quantile regression forests. *Hydrological Processes*, v.22, p.4892-4904, 2008.

- Lima Neto, I. E.; Wiegand, M. C.; Araújo, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semiarid Brazilian basin. *Hydrological Sciences Journal*, v.56, p.319-333, 2011.
- López-Tarazón, J. A.; Batalla, R. J.; Vericat, D.; Francke, T. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, v.109, p.210-221, 2009.
- Malveira, V. T. C.; Araújo, J. C.; Güntner, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, v.17, p.109-117, 2012.
- Mano, V.; Némery, J.; Belleudy, P.; Poirrel, A. Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): Influence of the climatic regime. *Hydrological Processes*, v.23, p.777-792, 2009.
- Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Magnago, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.1306-1313, 2011.
- Minella, J. P. G.; Merten, G. H.; Reichert, J. M.; Clark, R. T. Estimating suspended concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological processes*, v.22, p.1819-1830, 2008.
- Morris, G. L.; Fan, J. Reservoir sedimentation handbook: Design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. New York: McGraw-Hill Educ., 1997. 783p.
- Navratil, O.; Esteves, M.; Legout, C.; Gratiot, C.; Nemery, J.; Willmore, S.; Grangeon, T. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology*, v.398, p.246-259, 2011.
- Old, G. H.; Leeks, G. J. L.; Packman, J. C.; Smith, B. P. G.; Lewis, S.; Hewitt, E. J.; Holmes, M.; Young, A. The impact of a convective summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment Bradford, West Yorkshire. *The Science of the Total Environment*, v.314, p.495-512, 2003.
- Silva, L. B. S. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Brasília: UNB, 2010. 241p. Tese Doutorado
- Silva, V. P. S.; Montenegro, A. A. A.; Silva, T. P. N.; Guerra, S. M. S.; Santos, E. S. Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.1073-1081, 2011.
- Singh, V. P.; Frevert, D. K. Watershed models. 1.ed. New York: CRC Press. 2006. 653p.
- Wren, D. G.; Barkdoll, B. D.; Kuhnle, R. A.; Derrow, R. W. Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.126, p.97-104, 2000.
- Xu, K.; Milliman, J. D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, v.104, p.276-283, 2009.
- Zhu, T. X.; Luk, S. H.; Cai, Q. G. Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China. *Journal of Hydrology*, v.257, p.78-90, 2002.