

Uso de sensoriamento remoto no monitoramento de sólidos em suspensão do reservatório de uma usina hidrelétrica na transição Cerrado-Amazônia

Juliana Marestoni Simões¹ , Frederico Terra de Almeida^{2*} , Eduardo Morgan Uliana² , Laurimar Gonçalves Vendrusculo³ 

1 Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do Mato Grosso, Av. Tancredo Neves, 1095 - Cavallhada II, Cáceres - MT, 78200-000; Companhia Energética SINOP, Av. dos Flamboyants, 685 - Jardim Botânico, Sinop - MT, 78556-024.

2 Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – ICAA, Universidade Federal do Mato Grosso - Campus de Sinop, Avenida Alexandre Ferronato, no. 1200 - Reserva 35, Distrito Industrial. Sinop, MT, 78557-267.

3 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para a Agricultura. Av. Andre Tozello, 209, Cidade Universitaria - Campinas, SP – Brasil, 13083886.

*Autor para correspondência: fredterr@gmail.com

Recebido em 23 de julho de 2021.

Aceito em 05 de novembro de 2021.

Publicado em 11 de novembro de 2021.

Resumo - O uso de sensoriamento remoto no monitoramento de sólidos em suspensão do reservatório de uma usina hidrelétrica (UHE) na transição Cerrado-Amazônia é importante para conhecimento espacial e temporal da deposição de sedimentos nas estruturas da barragem. Dessa forma, este estudo avalia o Índice da Diferença Normalizada de Água (NDWI) no monitoramento das concentrações de sedimentos em suspensão (C_{ss}) no reservatório da UHE Sinop. Utilizou-se dados de campo coletados trimestralmente para validação. Estes dados foram comparados ao índice NDWI em imagens de satélite Sentinel-2A e 2B processadas no *software Arcgis 10.1*. Para verificar o desempenho dos dados estimados foram realizados os testes em ambiente R: erro absoluto médio, raiz do erro quadrático médio, viés, Índice de concordância de Willmott e Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}). O teste de significância estatística apresentou valor de R^2 0,66 para estação Montante 01 e 0,70 para a estação Jusante Barramento, verificando a eficiência dos dados estimados pelo índice NDWI o modelo foi “satisfatório”, porém conclui-se que esta ferramenta de geoprocessamento não se apresenta, no momento, como substituta as coletas tradicionais, mas como apoio ao monitoramento contínuo e de alerta à possíveis alterações, permitindo melhores avaliações e possivelmente tomada de decisão mais condizente com a realidade.

Palavras-chave: Assoreamento. Coleta de sedimentos. NDWI. Rio Teles Pires. Sentinel-2/MSI.

Use of remote sensing in monitoring suspended solids in the reservoir of a hydroelectric plant in the Cerrado-Amazônia transition zone

Abstract - The use of remote sensing in monitoring suspended solids in the reservoir of a hydroelectric plant (UHE) in the Cerrado-Amazônia transition is justified due to the need to monitor the sediment deposition in the dam structures. Thus, this study uses the Normalized Water Difference Index (NDWI) in monitoring the concentrations of suspended sediments (C_{ss}) in the Sinop HPP reservoir. The data were obtained through field collection, performed quarterly, and application of the NDWI

index on satellite images in the Arcgis 10.1 software. To verify data performance, tests were run in an R programming environment, using the mean absolute error, root of the mean square error, bias, Willmott's concordance index and Nash-Sutcliffe efficiency index (ENS). The coefficient of determination showed a value of R^2 0.66 for station Amount 01 and 0.70 for the station Jusante Barramento. Regarding the efficiency of the data estimated by the NDWI index, the model was deemed "satisfactory". However, it is concluded that this geoprocessing tool does not currently stand as a substitute for traditional collections, but as a support for continuous tracking and alert of possible changes, allowing for better assessments and possibly more realistic decision making.

Keywords: Silting; Sediment collection; NDWI, Teles Pires River, Sentinel-2/MSI.

Uso de la teledetección en el monitoreo de sólidos en suspensión del reservorio de una central hidroeléctrica en la transición Cerrado-Amazonía

Resumen: El uso de la teledetección en el monitoreo de sólidos en suspensión en el reservorio de una central hidroeléctrica (CH) en la transición Cerrado-Amazonía es importante para el conocimiento espacial y temporal de la deposición de sedimentos en las estructuras de la presa. Por lo tanto, este estudio evalúa el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) en el monitoreo de las concentraciones de sedimentos en suspensión (C_{ss}) en el reservorio de la CH de Sinop. Los datos se obtuvieron a través de la recolección de campo, realizada trimestralmente y la aplicación del índice NDWI en imágenes de satélite en el software Arcgis 10.1. Para verificar el desempeño de los datos estimados se realizaron pruebas en un ambiente R: error absoluto medio, raíz del error cuadrático medio, sesgo, índice de concordancia de Willmott e índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS). La prueba de significación estadística presentó un valor de R^2 0.66 para la estación Upstream 01 y 0.70 para la estación de aguas abajo de represa, verificando la eficiencia de los datos estimados por el índice NDWI, el modelo fue "satisfactorio", pero se concluye que esta herramienta de geoprosesamiento actualmente no se presenta como un sustituto de las recogidas tradicionales, sino más bien como un soporte para el seguimiento continuo y de alerta a posibles cambios, permitiendo mejores evaluaciones y posiblemente una toma de decisiones más acorde con la realidad.

Palabras Clave: Sedimentación. Recogida de Sedimentos. NDWI. Río Teles Pires. Sentinel-2/MSI.

Introdução

A maior parte da matriz energética brasileira é constituída pela energia originada de fontes hidrelétricas, compreendendo cerca de 60% de toda potência instalada do país (Souza et al. 2019). De maneira genérica, a construção de uma usina hidrelétrica, visa suprir a demanda de energia elétrica pela população, contudo, ao passo em que sua instalação propicia inúmeros benefícios à sociedade, a barragem interrompe o curso normal do rio, formando reservatórios e alterando as condições naturais do curso d'água, culminando em uma série de modificações físicas, ambientais e até mesmo, sociais (Queiroz et al. 2013).

Os efeitos da alteração na dinâmica natural de escoamento do rio derivam sobretudo em um ambiente mais susceptível aos efeitos da erosão hídrica, por meio da sedimentação dos sólidos transportados pela água, capaz de interferir, até mesmo, nas frações de material em suspensão e arraste (Tasca et al. 2018). Neste cenário, a deposição de sedimentos ocasiona, gradativamente, a diminuição da capacidade de armazenamento do reservatório e, como consequência, além de ocasionar danos

à qualidade da água, este assoreamento pode acarretar perda da capacidade de regularização e de geração de energia, em outras palavras, a redução no seu tempo de vida útil (Campos et al. 2018).

Carvalho (2008) afirmou que a retenção do material particulado nos reservatórios é inevitável, e que este fato, associado aos eventos externos, a exemplo a erosão antrópica, podem maximizar substancialmente o processo de retenção. Por este motivo que o desenvolvimento e o monitoramento de práticas de gestão e uso e ocupação da terra dessas bacias hidrográficas, possui importância tanto econômica, envolvendo a capacidade de geração de energia, quanto ambiental, no que diz respeito à conservação dos recursos naturais e biodiversidade. Assim, justifica-se o grande interesse em reconhecer a interferência dos processos que envolvem a alteração da cobertura do solo nas áreas de influência direta das Usinas Hidrelétricas (UHE), de modo a compreender os impactos que podem ser gerados, bem como as formas de mitigação e gestão sustentável (Corrêa et al. 2015).

Por meio da quantificação dos sedimentos transportados é possível caracterizar e avaliar a situação dos reservatórios, em termos de vida útil, para diversas aplicações dentre elas: suprimento de água, irrigação e energia elétrica (Annandale et al. 2016). Para tanto, existem diferentes maneiras de calcular o volume assoreado de reservatórios. O cálculo da distribuição de sedimentos nos reservatórios é comumente realizado por meio da coleta de dados em uma rede sedimentométrica pré-estabelecida, que permite o acompanhamento da evolução da deposição (Galharte et al. 2014). Embora o delineamento operacional em campo para a determinação do gerenciamento ambiental contribua com uma análise confiável, Giardino et al. (2014) defenderam que quando sincronizados os dados de campo com imagens de satélites, estes podem ser utilizados na validação de produtos voltados para a caracterização da qualidade da água, na avaliação da presença de sedimentos.

De acordo com o estudo de Chelotti et al. (2019), considerando que as várias entradas de sedimentos locais no reservatório não são monitoradas adequadamente, o uso do monitoramento hidrológico por meio de imagens de satélite é eficiente, pois, por meio desta tecnologia, é possível monitorar a cor da água ao seu conteúdo. Este é um fato perceptível, uma vez que durante a fase de deposição de sedimentos no leito dos reservatórios existe a mudança na coloração da água, devido à alteração das concentrações de sedimentos suspensos (Vilhena e Meneses 2003).

Neste contexto, de forma integrada, o sensoriamento remoto, que é um conjunto de técnicas de obtenção de dados da superfície terrestre, pode complementar as informações das convencionais medidas diretas, visto que as imagens de satélite possuem atributos capazes de avaliar a variabilidade espectral da superfície da água (Rodrigues et al. 2016). Esse conjunto de técnicas, além de reduzir os custos e o tempo de análise, permite investigar, por meio de dados advindos de índices radiométricos, o deslocamento do material suspenso, obtendo-se maior detalhamento nas relações entre os corpos d'água e os demais elementos do ambiente (Borges et al. 2015).

Os índices radiométricos são operações com medidas radiométricas, obtidos através da razão entre bandas, sendo utilizados para realçar as diferenças espectrais de um par de bandas, de modo a permitir uma combinação ou integração de vários parâmetros (Pereira et al. 2018). Neste contexto, os índices espectrais de água têm sido amplamente utilizados devido à precisão na detecção de corpos hídricos a baixo custo computacional, em especial o Índice da Diferença Normalizada de Água - NDWI (*Normalized Difference Water Index*) que utiliza as bandas do infravermelho próximo e infravermelho médio (Du et al. 2016). Nascimento et al. (2019) corroboram este fato afirmando que além do NDWI, diferentes métodos vêm sendo desenvolvidos para delinear e detectar corpos hídricos por meio de imagens de satélite, como o Índice de Água de Diferença

Normalizado Modificado (MNDWI), cuja finalidade é aumentar seu alcance em regiões rasas, afirmando que ao utilizar a banda do infravermelho médio, ao invés de uma banda do infravermelho próximo é possível destacar melhor o corpo hídrico quando comparado aos demais alvos.

O NDWI é derivado do mesmo raciocínio e operações de banda aplicadas ao Índice da Diferença Normalizada de Vegetação - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Borges et al. 2015), sendo que em sua metodologia ocorre a substituição de variáveis, em que é utilizada a banda verde visível, ao invés da vermelha, assim o comprimento de onda do verde aplicado é de modo maximizar a reflectância típica da água e o infravermelho próximo utilizado a fim de minimizar a baixa reflectância dos corpos de água, dessa forma, ao final é possível realçar o contraste entre a água e a presença de alvos no corpo hídrico (McFeeters 1996). Com base em suas curvas de reflectância espectral, sua metodologia de aplicação permite ressaltar as feições da água e realizar inspeções visuais na caracterização da produção de sedimentos da bacia, sendo possível a identificação de locais com maior aporte de sedimentos, assim como, seu deslocamento (Pinese 2014).

Assim, se destaca o mapeamento da extensão de corpos d'água e da superfície líquida devido à alta absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda correspondente ao NIR (*Near Infrared*), que significa Infravermelho Próximo e, à reflectância das micro-ondas pela água (Brenner e Guasselli 2015). Salienta-se que os valores do índice NDWI variam de -1 a 1, tendo McFeeters (1996) definido zero como o limiar, em que, quanto mais próximos os valores de 1 (um positivo) correspondem às áreas de ausência de sedimentos em suspensão, enquanto os valores que se aproximam de -1 (um negativo) correspondem a intensa presença de sedimentos em suspensão ou maior concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}).

Brenner e Guasselli (2015) utilizaram o NDWI com o objetivo identificar os meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí, demonstrando a aplicação do índice para uma série temporal de imagens orbitais e verificaram que o índice correspondeu positivamente ao objetivo de ressaltar a lâmina d'água. Ainda, partindo do pressuposto de que pesquisadores desenvolvem índices espectrais para monitorar e qualificar as condições e distribuições de diferentes feições na superfície terrestre, Bezerra et al. (2019) buscaram analisar as respostas espectrais e espaciais do índice NDWI entre os sensores OLI e MSI, no entorno do reservatório Poço da Cruz, região semiárida de Pernambuco. Concluíram que o satélite Sentinel-2/MSI possibilitou um maior delineamento do espelho d'água, evidenciando ainda mais seu potencial de uso.

Embora o NDWI proposto por McFeeters (1996) tenha como finalidade detectar águas superficiais em ambientes de zonas úmidas e permitir a medição de sua extensão, ou seja, correlacionar o teor de água de razão da reflectância observada, sua abrangência não se limita apenas a uma finalidade. Souza et al. (2019) analisaram os Índices NDVI e NDWI e possíveis mudanças nos dados de cobertura do solo e precipitação com o objetivo de verificar se o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) influencia a segurança hidrológica em bacias hidrográficas, e, ao avaliar os efeitos do PSA sobre o estresse hídrico, a partir da aplicação dessas técnicas, descobriram que havia diferença da quantidade de água disponível primeiramente monitorada.

De fato, a comprovação da eficiência quanto à utilização de fontes alternativas em amostragem de sedimentos são de implicações notáveis para a hidrossedimentologia (Reinwarth et al. 2019), e a aplicação de técnicas de processamento de imagem para extração de informação, para geração de

carta imagem se justifica na necessidade de acelerar o entendimento da realidade de determinado corpo hídrico. Além da informação regional de monitoramento de sedimento, essa técnica é uma forma menos onerosa, que visa a tomada de decisão em tempo adequado e no local que for necessário. Nessa lógica, partindo-se do ponto de que os dados obtidos após o processamento de imagens de satélites podem subsidiar a avaliação e a análise de recursos hídricos, a aplicação do NDWI atua como técnica de suporte ao gerenciamento eficiente de águas superficiais (Rokni et al. 2014). Em suma, sensores orbitais possivelmente podem produzir dados potencialmente complementares para o estudo hidrológico, permitindo um monitoramento espacial e sistemático, em vista disso, este estudo tem como objetivo a avaliação do índice NDWI em relação ao monitoramento dos sedimentos em suspensão das afluentes e defluência do reservatório da Usina Hidrelétrica Sinop, localizada numa área de transição Cerrado-Amazônia.

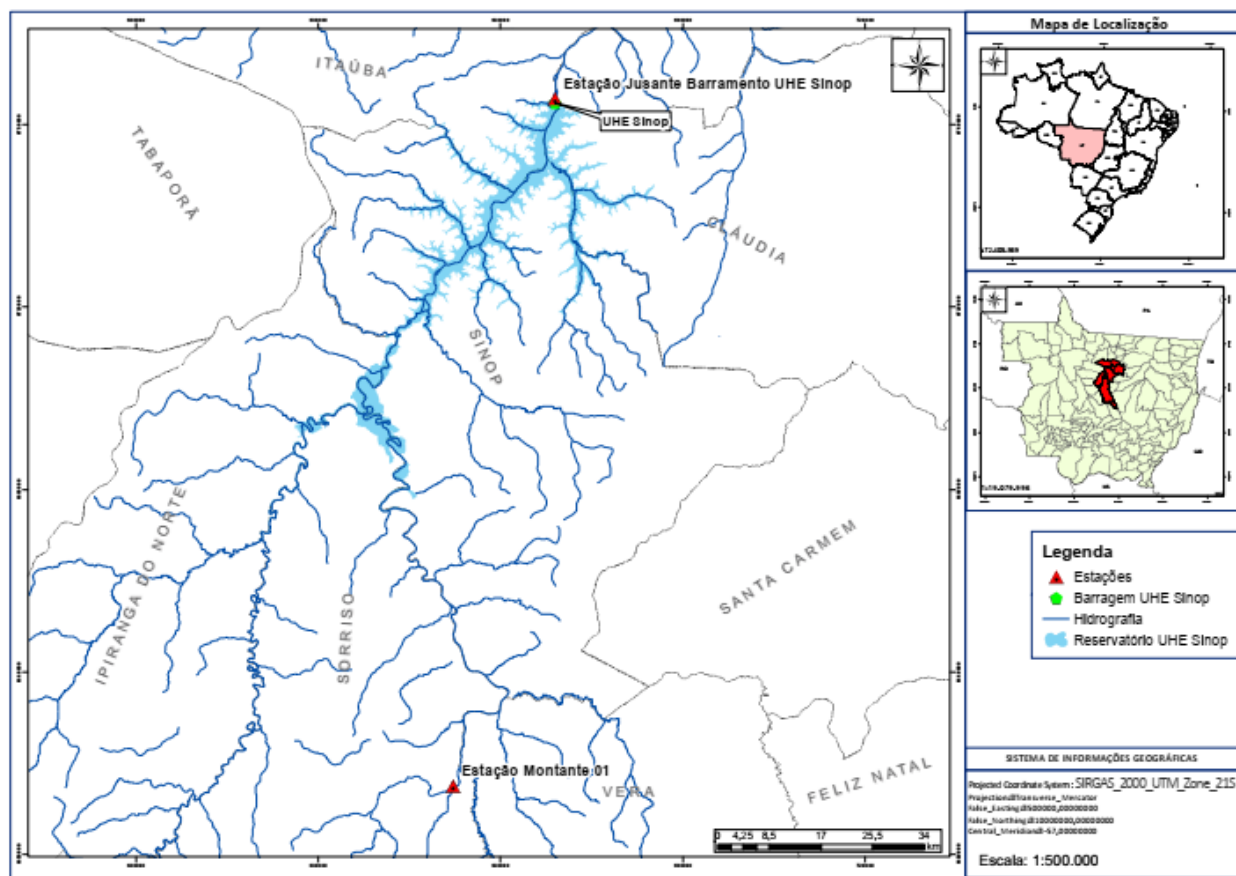
Material e Métodos

Área de Estudo

O reservatório da UHE Sinop é formado pelo rio Teles Pires, o qual a partir da confluência com o rio Juruena, constitui a bacia hidrográfica do rio Tapajós. O rio Teles Pires percorre dois dos grandes biomas brasileiros, está inserido na região de transição entre Cerrado-Amazônia, e sua bacia hidrográfica ocupa terras nos estados de Mato Grosso e Pará (MMA, 2011). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é o tipo Aw, tropical quente e úmido, caracterizado pela presença de duas estações bem definidas, cuja sazonalidade ambiental se define em ciclos de seca e de inundação, compreendendo os períodos de seca, enchente, cheia e vazante. Com precipitações pluviárias médias anuais de 1.970 mm, a temperatura média anual varia entre 24 e 27°C e umidade relativa do ar entre 66 a 86% (Souza et al. 2013).

Com o eixo do barramento instalado nos municípios de Itaúba (margem esquerda) e Cláudia (margem direita), o reservatório da UHE Sinop abrange também parte dos municípios de Ipiranga do Norte, Sinop e Sorriso e apresenta como importante tributário o rio Verde (Figura 1) (PBA, 2013). A área total do reservatório é de aproximadamente 342 km² e sua operação deverá ocorrer até a elevação de uma cota prevista em projeto igual a 302,00 m. Em sua regra operativa é previsto o rebaixamento, de forma transitória na cota 300,00 m, para o período de julho a outubro de cada ano. Essa capacidade de regularização permite um deplecionamento de 10 m, qual seja na cota 292,00 m. A média de longo termo para a vazão do reservatório corresponde a 935 m³s⁻¹ e o tempo de residência médio da água no reservatório é de 39 dias (PUR, 2017). Dentre os principais tributários contribuintes para o reservatório, tem-se aqueles formados pelo rio Verde, rio Índio Possesso, rio Roquete, córrego Loanda, rio Selma, ribeirão Araciaba, córrego Caldeirão e córrego Fundo. Conforme dados disponibilizados pela Companhia Energética Sinop (Sinop Energia) a área de inundação, incluindo ilhas ou parte destas na calha do rio Teles Pires, representa cerca de 34.000 hectares.

Figura 1. Localização do reservatório da UHE Sinop, rio Teles Pires, Mato Grosso - Brasil.



Coletas em Campo

Os dados utilizados fazem parte do Programa de Monitoramento Hidrológico e Hidrossedimentológico da UHE Sinop (item - 3.3.2 do PBA), dessa forma os trabalhos em campo foram realizados pela UHE Sinop, em duas estações de monitoramento, localizadas no rio Teles Pires, caracterizadas conforme Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização das estações hidrossedimentométricas cujos dados de monitoramento foram utilizados para desenvolvimento da pesquisa.

	“Estação Montante 01”	“Estação Jusante Barramento”
Código Hidroweb	17277300	17280980
Coordenadas	12°17'17,17” S e 55°36'02,78” W	11°15'54,86” S e 55°27'04,53” W
Elevação	309 m	274 m
Monitoramento	Pluviométrico, fluviométrico, medição de descarga líquida, medição de descarga sólida e transmissão telemétrica.	

Foram considerados os dados coletados em 12 campanhas de medição no período compreendido entre março de 2017 e dezembro de 2019, com periodicidade trimestral, contemplando diferentes períodos sazonais (seca, enchente, cheia e vazante).

Utilizou-se a metodologia proposta por Carvalho (2008) para amostragem em suspensão, sendo utilizado o método Igual Incremento de Largura (IIL), utilizando o amostrador DH59 para uso com guincho fluviométrico. As coletas, foram realizadas em 10 verticais, igualmente espaçadas, estabelecidas em função da largura do rio. Em laboratório, a determinação da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) foi obtida por meio da metodologia de filtragem, proposta também por Carvalho (2008), em que é realizada a separação da água e do sedimento por meio de um sistema de filtragem a vácuo, com auxílio de um filtro de papel. Assim, o volume dos sedimentos é obtido pela diferença de massa apresentada entre o peso inicial do filtro e final (após a filtração). Destaca-se que o volume da C_{ss} dado em $g L^{-1}$, pela razão do peso total de sedimentos pelo volume de água da amostra original (Equação 01).

Equação 01:

$$CSS = \frac{P1 - P0}{Vol}$$

Em que: C_{ss} - Concentração sedimentos em suspensão ($mg L^{-1}$); P1 - Peso final (mg); P0 - Peso inicial (mg); Vol - Volume inicial (L).

Processamento Digital das Imagens

Para este trabalho foram utilizadas as imagens Sentinel-2A e 2B adquiridas pelo sensor Multispectral Instrument (MSI) e distribuídas gratuitamente pela Agência Espacial Européia (ESA). As principais características são mostradas no Quadro 2.

Quadro 2. Caracterização das cenas do Satélite Sentinel-2 A e 2B utilizadas nas análises.

Satélite	Número de Bandas	Resolução Radiométrica	Resolução Temporal	Bandas	
				Verde	Infravermelho próximo
Sentinel-2	13 (MSI)	12 bits	5 dias	Banda 3 (0,54 – 0,58); 10 m	Banda 8 (0,78 – 0,90); 10 m

Fonte: Bezerra et al. (2019).

As imagens utilizadas neste estudo usaram o nível 1C de processamento, o qual infere a correção geométrica e radiométrica (ortoretificada), com métodos que incluem o uso de modelos digital de elevação (DEM) para corrigir distorções geométricas da terra e o uso de reflectância no topo da atmosfera (Top-Of-Atmosphere - TOA), com resolução espacial de 10 metros no sistema UTM/WGS84 de projeção. Considerando que, a abordagem deste estudo foi extrair o valor do pixel das imagens referente a localização das estações hidrossedimentométricas optou-se por não restringir o percentual de cobertura de nuvens. Todavia em alguns casos, a presença excessiva de nuvens na área

de interesse inviabilizou a escolha de imagens dos dias exatos das coletas. Neste caso, para a seleção das imagens foram consideradas as datas mais próximas às de realização da coleta em campo.

Para realçar a presença das feições de água e realizar as operações com as bandas espectrais, foi utilizado o *software* de geoprocessamento ArcGis 10.1. O índice NDWI utiliza no sensor do *Sentinel 2/MSI* as bandas 3 (verde) e 8 (infravermelho próximo), e seu cálculo é gerado a partir da diferença entre as reflectâncias no topo da atmosfera (TOA) das bandas do infravermelho próximo e verde, dividido pela soma das reflectâncias dessas duas bandas (Equação 02).

Equação 02:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Em que: GREEN - B03 é o valor digital do *pixel*, na faixa verde do espectro visível; NIR - B08 é o valor do *pixel* na faixa do infravermelho próximo.

Na determinação do valor de NDWI, para definir o *pixel*, foram utilizadas as coordenadas geográficas de localização de cada estação hidrossedimentológica, caracterizando-se de um ponto específico, cuja abrangência corresponde a 10 x 10 m. Isso porque o índice avaliado (NDWI) tem como finalidade a detecção de águas superficiais.

Análise Estatística

As análises foram realizadas em ambiente R de programação (R Core Team 2019), os resultados obtidos sumarizados de modo descritivo e os gráficos foram construídos com o pacote *ggplot2* (Wickham 2016).

Para determinar por diferenças no material em suspensão entre os locais de amostragem (ponto à montante e ponto à jusante), foram construídos dois modelos gerais linearizados mistos (GLMM), função *glmmPQL* no pacote MASS, (Venables e Ripley 2002), um para concentração de sedimento em suspensão coletado em campo, e outro para dados obtidos para o modelo NDWI. Esta metodologia foi escolhida devido ao argumento existente na função que corrige os dados temporais com possível efeito de autocorrelação temporal. Isso porque os pontos foram amostrados várias vezes no tempo, em caráter trimestral. Dessa forma, para controlar a autocorrelação temporal foram utilizadas as repetições no tempo como variável aleatória no modelo.

O teste de significância estatística foi calculado por análise de desvios quadrados do tipo II (função *Anova* do pacote *car*, (Fox e Weisberg 2019). Na análise da confiabilidade da aplicação de ferramentas de geoprocessamento para análise da C_{ss} foram realizadas regressões lineares para os resultados de campo de ambos os pontos de coleta, que assumem distribuição normal de erros. Os modelos de regressão foram construídos com a função *lm* do pacote *vegan* (Oksanen et al. 2019).

Para verificar a eficiência dos dados estimados pelo índice NDWI, os resultados obtidos foram comparados com os dados observados nas 2 (duas) estações de monitoramento, por meio dos seguintes parâmetros estatísticos descritos por Willmott (1982) e Krause et al. (2005): erro absoluto médio (MAE) (equação 03), raiz do erro quadrático médio (RMSE) (equação 04), viés (equação 05), Índice de concordância de Willmott (d) (equação 06) e Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}) (equação 07).

Equação 03:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|$$

Equação 04:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5}$$

Equação 05:

$$VIÉS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)$$

Equação 06:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

Equação 07:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2}$$

Em que: P_i - é o valor da C_{ss} estimada (mg L^{-1}); O_i - a C_{ss} observada (mg L^{-1}); O - a média das concentrações observadas (mg L^{-1}); e N - o número de valores da amostra.

A classificação sugerida por Van Liew et al. (2007) foi utilizada para avaliar o desempenho dos modelos com relação ao índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (E_{NS}), nesse caso: $E_{NS} = 1$ significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; $E_{NS} > 0,75$ indica que o modelo é adequado e bom; $0,36 < E_{NS} < 0,75$ indica que o modelo é considerado satisfatório; e $E_{NS} < 0,36$ indica que o modelo não é satisfatório. O índice de concordância de Willmott varia de 0 a 1, onde 1 indica concordância perfeita, logo valores próximos à unidade indicam melhor o desempenho do modelo na predição.

O viés foi utilizado para verificar a existência de subestimativa (valor positivo) ou superestimativa (valor negativo) pelo modelo (Matos et al. 2017). Para diagnosticar a variação dos erros nas séries de concentração estimada pelo NDWI, utilizou-se os índices MAE e o RMSE analisados ao tempo, em que valores de MAE e RMSE iguais a zero indicam ajuste perfeito do modelo à série de dados observados (Moriassi et al. 2007).

Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados das 12 campanhas de medições, abrangendo as medições de descarga líquida e sólida em ambas as estações, apresentando variações de vazões de 116,46 a 899,53 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, e concentrações de sólidos em suspensão (C_{ss}) variando de 8,91 a 42,17 mg L^{-1} , a montante da barragem; e vazões de 349,26 a 1.978,92 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, e C_{ss} de 3,68 a 32,5 mg L^{-1} , a jusante da barragem da UHE Sinop. Isso estabelece maiores vazões líquidas e menor concentração de sedimentos à jusante em relação a seção a montante do barramento, demonstrando claro sinal de retenção de sedimentos

e diferenciação das seções, e implicando na necessidade de avaliações e interpretações diferentes dos regimes hidrossedimentológicos das seções avaliadas.

A partir dos dados de monitoramento hidrossedimentológico, nota-se uma relação diretamente proporcional entre a concentração de sólidos em suspensão e a vazão líquida, em que os menores valores de vazão corresponderam a menores valores de C_{ss} , com pares de 116,46 $m^3 s^{-1}$ e 12,84 $mg L^{-1}$, e outro com 131,31 $m^3 s^{-1}$ e 8,91 $mg L^{-1}$, para montante; e pares de 349,26 $m^3 s^{-1}$ com 5,63 $mg L^{-1}$, e 899,38 $m^3 s^{-1}$ com 3,68 $mg L^{-1}$, para jusante.

Observou-se que os níveis de vazão atingem seu máximo nas campanhas realizadas no mês de março com valores menores para montante (645,32 $m^3 s^{-1}$ em 2017, 637,08 $m^3 s^{-1}$ em 2018, e 899,53 $m^3 s^{-1}$ em 2019), do que para jusante (1708,34 $m^3 s^{-1}$ em 2017, 1794,89 $m^3 s^{-1}$ em 2018, e 1978,92 $m^3 s^{-1}$ em 2019), decrescendo nos meses seguintes, em consonância ao comportamento sazonal das chuvas, com as taxas mais baixas em setembro, e ainda menores para montante (116,46 $m^3 s^{-1}$ em 2017, 122,71 $m^3 s^{-1}$ em 2018, e 131,31 $m^3 s^{-1}$ em 2019), do que para jusante (359,66 $m^3 s^{-1}$ em 2017, 552,17 $m^3 s^{-1}$ em 2018, e 349,26 $m^3 s^{-1}$ em 2019), e, em geral, verificamos que quanto maior a vazão, maior a concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela 1. Resultado das medições hidrossedimentométricas coletados em campo, no rio Teles Pires, no período de 2017 a 2019.

DATA	LOCAL (Código)	N.A.	Q	Vm	L	Pm	C's	TEMPERAT. (°C)	
								ÁGUA	AR
07/03/2017		8,97	645,32	1,04	83,48	7,71	26,89	26,5	31,8
06/06/2017		4,58	242,49	0,74	106,12	3,07	24,62	27,3	32,5
19/09/2017		3,48	116,46	0,56	92,15	2,26	12,84	27,6	33,6
05/12/2017		7,35	555,33	0,92	104,85	5,74	33,56	27,7	31,6
06/03/2018		8,51	637,08	1,03	85,93	7,17	29,83	24,7	26,7
12/06/2018	E. H. Régua Montante 01 (17277300)	4,35	184,90	0,66	97,57	2,87	18,41	22,8	32,1
04/09/2018		3,55	122,71	0,57	97,30	2,21	15,15	26,1	34,5
19/12/2018		5,46	357,45	0,88	103,55	3,93	37,84	27,9	31,5
05/03/2019		9,02	899,53	1,06	114,46	7,44	36,10	26,3	32,6
13/06/2019		2,96	220,13	0,70	106,61	2,96	10,66	25,8	31,6
04/09/2019		3,60	131,31	0,55	100,65	2,38	8,91	27,5	33,2
11/12/2019		6,12	463,67	0,941	110,687	4,45	42,17	28,10	31,80

DATA	LOCAL (Código)	N.A.	Q	Vm	L	Pm	C's	TEMPERAT. (°C)	
								ÁGUA	AR
08/03/2017		7,85	1708,34	1,19	347,49	4,12	25,64	26,7	30,7
07/06/2017		5,94	699,80	0,83	350,41	2,41	17,87	26,6	31,4
20/09/2017		5,28	359,66	0,58	348,56	1,78	7,61	26,8	35,6
06/12/2017		6,40	966,58	0,90	350,55	3,07	26,47	27,3	32,4
08/03/2018		8,02	1794,89	1,27	353,70	3,99	32,50	23,1	29,6
13/06/2018	E. H. Jusante Barramento (17280980)	6,34	798,83	0,80	349,89	2,87	13,74	24,3	32,6
05/09/2018		5,98	552,17	0,67	349,69	2,38	10,89	25,5	29,5
20/12/2018		6,74	988,70	0,85	352,75	3,29	22,69	27,8	32,6
06/03/2019		8,26	1978,92	1,15	369,22	4,65	9,16	26,7	31,4
14/06/2019		6,74	899,38	0,79	352,84	3,24	3,68	27,1	30,5
05/09/2019		5,92	349,26	0,40	348,57	2,54	5,63	26	32,6
12/12/2019		6,64	819,00	0,74	359,11	3,07	6,70	28,8	33,1

Legenda: **N.A.** - Nível D'água (m) **Q** - Vazão Líquida (m^3s^{-1}) **Vm**- (Velocidade Média (ms^{-1}) **L**- Largura (m) **Pm** - Profundidade média (m) **C's** - Conc. de Sólidos em Suspensão ($mg.L^{-1}$).

O menor volume de vazão reduz a variabilidade das concentrações analisadas, indicando um corpo hídrico mais homogêneo. No início da estação chuvosa (referência dezembro), o baixo nível do rio associado ao grande volume de sedimentos transportados pelas primeiras chuvas, provoca um aumento na concentração de sedimentos. Embora haja essa variabilidade sazonal, os valores de sedimentos medidos são baixos, com média de 24,7 e 15,2 $mg L^{-1}$, para montante e jusante da barragem da UHE Sinop, respectivamente, e conforme pode ser verificado na Tabela 01.

Ainda, conforme apresentado na Tabela acima, comparando as duas estações, os valores de vazão líquida (Q) são maiores para estação “Jusante Barramento” do que para estação “Montante 01”, isso ocorre em razão da força da água ao passar pela estrutura da barragem (vertedouro). Ainda comparando ambas, em se tratando dos valores obtidos para C_{ss} , a estação “Jusante Barramento” apresenta valores bem menores, isso porque a tendência é que os sedimentos se depositem no reservatório e somente seja capaz de ultrapassar as estruturas da barragem aqueles mais finos. Embora a tendência de menor C_{ss} seja atribuída a estação “Jusante Barramento”, nota-se que os meses de março e dezembro apresentam valores mais elevados, possivelmente justificado pela movimentação da construção da barragem, bem como força da correnteza dado o período chuvoso.

Para estabelecer os valores estimados de sedimentos por imagem de satélite, optou-se por um ponto específico da imagem na seção, e não pela média de pontos da seção. Pesquisas realizadas por McFeeters (1996) e outros trabalhos baseados na proposta deste autor, como os de Gao (1996), mostram que o índice NDWI, destinado a delinear as feições de águas abertas e reforçar sua presença por meio de imagens digitais, varia quase linearmente com a espessura da lâmina da água, sendo a profundidade considerada um fator limitante muito ruim, no que diz respeito a potencialidade do NDWI. Ressalta-se que a metodologia é aplicada por cada autor, em razão da finalidade e objetivos

de seus estudos, e como a seção em estudo adequa-se a determinação de um ponto específico, os resultados devem ser avaliados com essa perspectiva.

É importante destacar que, para a delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia, Borges et al. (2015) definiram três pontos específicos, georreferenciando nas duas margens e no centro do rio, tendo para cada ponto selecionado dados de concentração de sedimentos em suspensão. Em consonância ao seu objetivo, Brenner e Guasselli (2015) fizeram um recorte das imagens para o rio Gravataí/RS, abrangendo os municípios de Gravataí, Glorinha, Santo Antônio da Patrulha e Viamão, uma vez que suas análises tinham o caráter de analisar uma área maior e não pontos específicos, observando a existência de uma área de planície de inundação ainda preservada no leito do canal retificado do rio Gravataí.

A Tabela 2 demonstra o comportamento dos valores estimados para cada coleta realizada, nas estações hidrossedimentológicas, e seus respectivos valores observados. Das 12 campanhas realizadas para estação “Montante 01”, somente 10 amostras foram utilizadas para inferir a comparação da ocorrência dos sedimentos em suspensão. Isso porque as cenas disponíveis para o mês de dezembro, cujo comparativo seria realizado nas campanhas dos anos de 2018 e 2019, possuíam forte presença de nuvens, inviabilizando a análise da imagem, sendo, portanto, desconsiderada. Para estação “Jusante Barramento”, foi possível utilizar 11, das 12 amostras coletadas em campo, já que para amostragem realizada em dezembro de 2019 as imagens de satélite apresentaram influência das nuvens. Cumpre registrar que mesmo com resolução espacial de 5 dias, não foi possível aplicar o índice as imagens e obter correlação.

Importante ressaltar o quanto o NDWI se apresenta afetado pela ocorrência de nuvens, em termos de resposta espectral pelas condições do entorno (pixels próximos). Na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão, Borges et al. (2015) relatam a mesma dificuldade para obtenção das imagens sem a presença de nuvens nas cenas. No que tange à variação entre os dias de obtenção dos dados observados e estimados, para observar possíveis influências foram verificados os dados de precipitação das estações meteorológicas a montante do reservatório, ou melhor, mais próximas as estações estudadas (estações Montante 01 e Jusante Barramento).

Tabela 2. Concentração de sedimentos (C_{ss}) obtida por amostra em campo, durante período de 2017 a 2019, e os quantitativos de NDWI obtidos por meio do geoprocessamento das imagens satélites *Sentinel 2*.

LOCAL DE COLETA	DATA DA COLETA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	DATA DA IMAGEM	NDWI (pixel)
ESTAÇÃO MONTANTE 01 (17277300)	07/03/2017	26,89	08/03/2017	0,191527
	06/06/2017	24,62	16/06/2017	0,193906
	19/09/2017	12,84	24/09/2017	0,142283
	05/12/2017	33,56	28/12/2017	0,290691
	06/03/2018	29,83	03/03/2018	0,224821
	12/06/2018	18,41	16/06/2018	0,179327
	04/09/2018	15,15	09/09/2018	0,195819
	05/03/2019	36,10	08/03/2019	0,312889
	13/06/2019	10,66	06/06/2019	0,208244
	04/09/2019	8,91	09/09/2019	0,118822

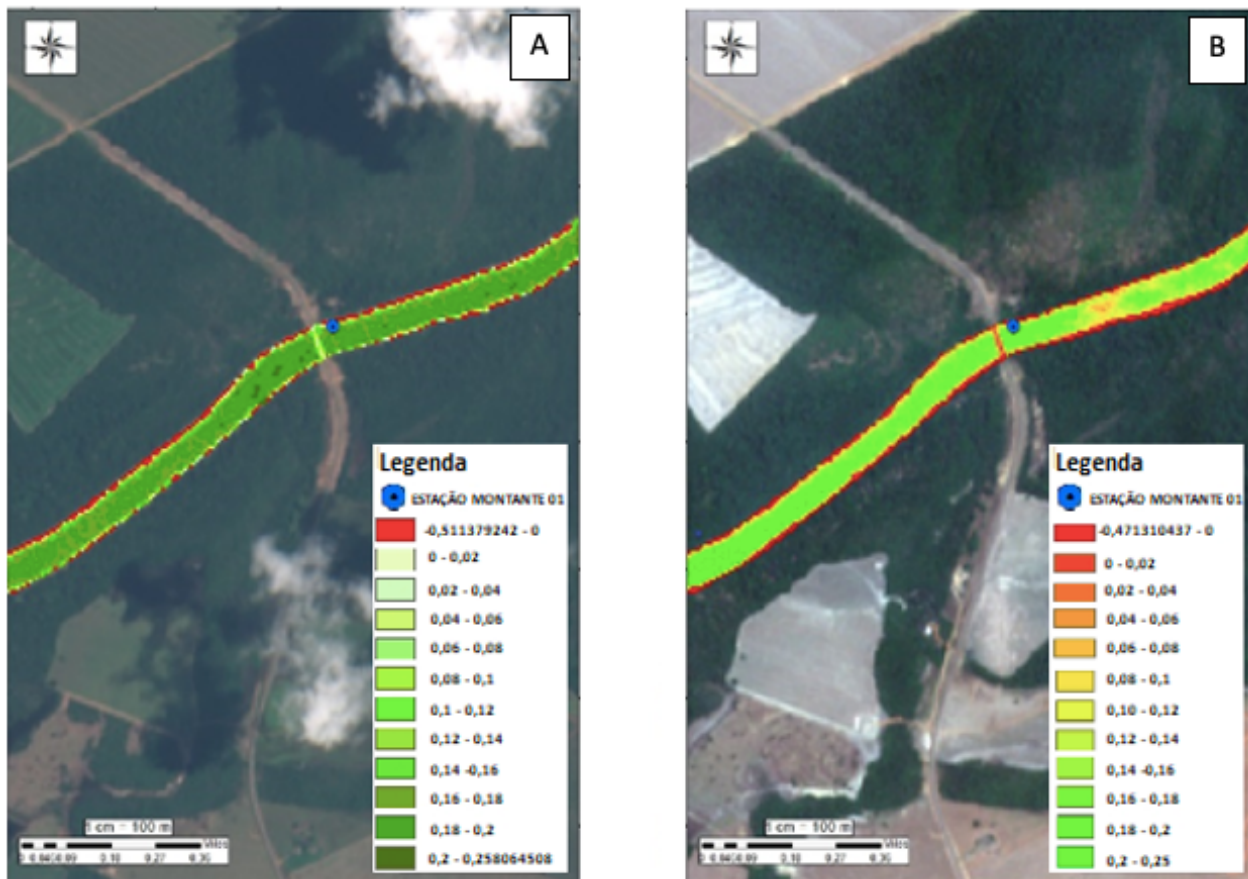
LOCAL DE COLETA	DATA DA COLETA	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	DATA DA IMAGEM	NDWI (pixel)
ESTAÇÃO JUSANTE BARRAMENTO (17280980)	08/03/2017	25,64	08/03/2017	0,330446
	07/06/2017	17,87	16/06/2017	0,244378
	20/09/2017	7,61	24/09/2017	0,151807
	06/12/2017	26,47	28/12/2017	0,332462
	08/03/2018	32,50	03/03/2018	0,395683
	13/06/2018	13,74	16/06/2018	0,232213
	05/09/2018	10,89	09/09/2018	0,232959
	20/12/2018	22,69	23/12/2018	0,287282
	06/03/2019	9,16	08/03/2019	0,143569
	14/06/2019	3,68	06/06/2019	0,256966
	05/09/2019	5,63	09/09/2019	0,205150

Analisando as respostas espectrais de ambas as estações, é possível realizar a análise espacial da C_{ss} . Em geral, o sensor conseguiu distinguir bem as classes propostas e observamos que os valores mais altos de reflectância, ou seja, maior evidência de sedimentos, são verificados na estação Jusante Barramento, nas amostragens realizadas imediatamente após o início das movimentações de construção da barragem, dado o progressivo incremento nos valores de concentração de sedimentos em suspensão.

A análise das imagens disponíveis mostra que, de maneira geral, as maiores concentrações de sedimentos em suspensão são encontradas numa faixa contínua próxima da costa e em águas com menores profundidades. Observamos que o pico de reflectância em todas as amostras está na área verde (Figura 2). O pico nesta faixa do espectro eletromagnético é típico do interior de águas com baixa C_{ss} , até 100 mg / L (Chelotti et al. 2019). À medida que as concentrações aumentam, o pico de reflectância começa a mudar para a coloração vermelha aplicada à imagem (Jensen 2009).

É possível perceber maior homogeneidade na estação Montante 01, indicando menor variabilidade na C_{ss} , embora os picos de reflectância nas regiões vermelhas da imagem demonstrem a existência de uma relação direta entre a reflectância nesta região do espectro eletromagnético e da C_{ss} . Nas águas interiores, esses efeitos são mais evidentes devido à sua menor reflectância para superfícies próximas, como vegetação ao redor de reservatórios (Sterckx et al. 2015). Visualmente os valores dos sedimentos em suspensão apresentam coerência com o gradiente de coloração aplicado.

Figura 2. Aplicação do índice NDWI, índice obtido (a) março/2017 – 0,19 e (b) setembro/2017 0,14 - Estação Montante 01.



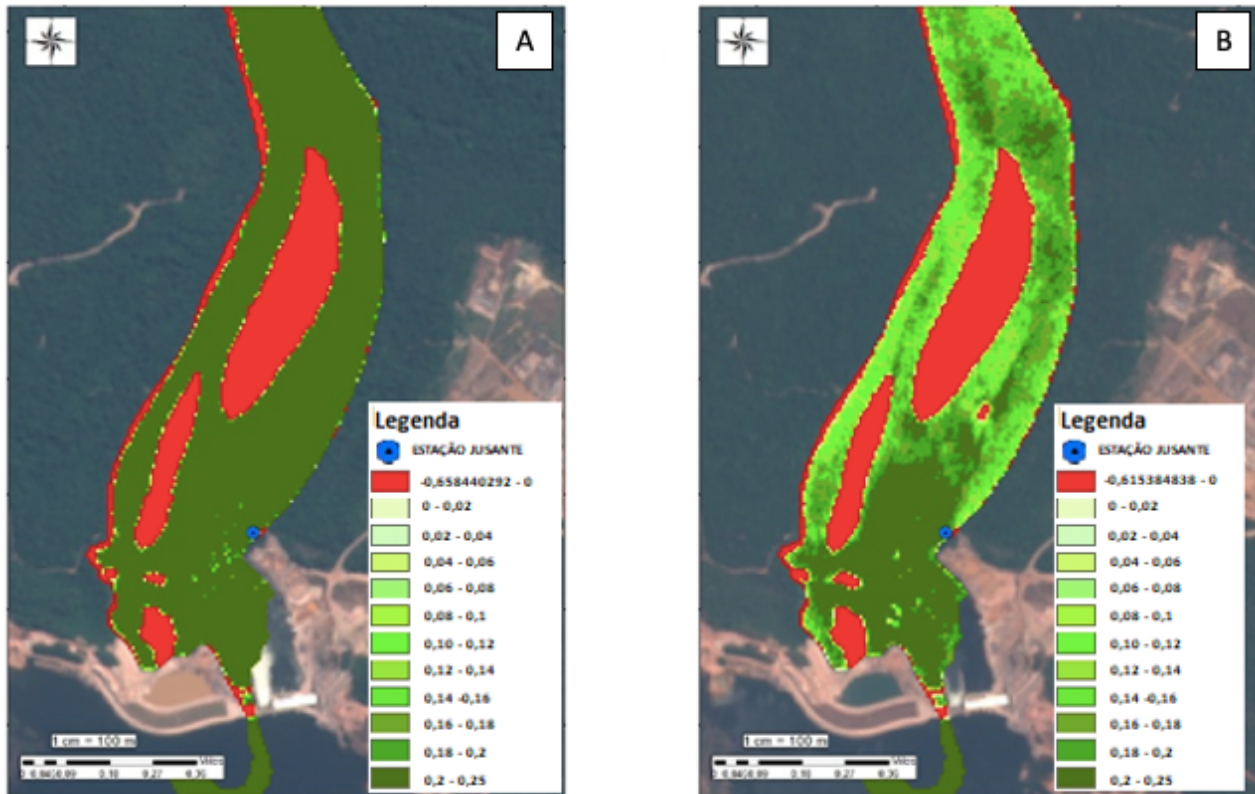
Conforme Martins et al (2017) afirmaram, devido os arredores do reservatório serem cobertos por vegetação, o contraste significativo da resposta espectral entre a vegetação e a superfície da água contribui para distorções dos pixels da água mais próximas da borda (Figura 3).

O reservatório apresenta-se em grande proporção com características de água mais clara, ou com menor concentração de sedimentos, e que pode ser visualizado ou caracterizado pelo aumento da concentração, a partir do aumento da seção transversal.

Para a estação “Jusante Barramento”, com exceção do período compreendido logo após a abertura do vertedouro da usina, o padrão dos sedimentos observado na região foi difuso e sem a presença marcante de frente de sedimentos. Nesse período, possivelmente por efeito da turbulência causada pela forte corrente da vazão, uma grande quantidade de sedimentos estão presentes no interior, mesmo não sendo tão expressivos os valores de C_{ss} obtidos em campo.

As margens apresentam maior concentração de sedimentos e os afluentes dos córregos tem o carreamento de sedimentos denunciado pela alta reflectância no espectro verde visível. Analisando os produtos do NDWI, ambas as estações apontam que o reservatório da UHE Sinop não apresenta valores de sedimentos elevados, com média de 24,7 e 15,2 $mg L^{-1}$, para montante e jusante da barragem da UHE Sinop, respectivamente, e conforme evidenciado nas figuras 03a (3,68 $mg L^{-1}$ em jun/2019) e 03b (5,63 $mg L^{-1}$ em set/2019).

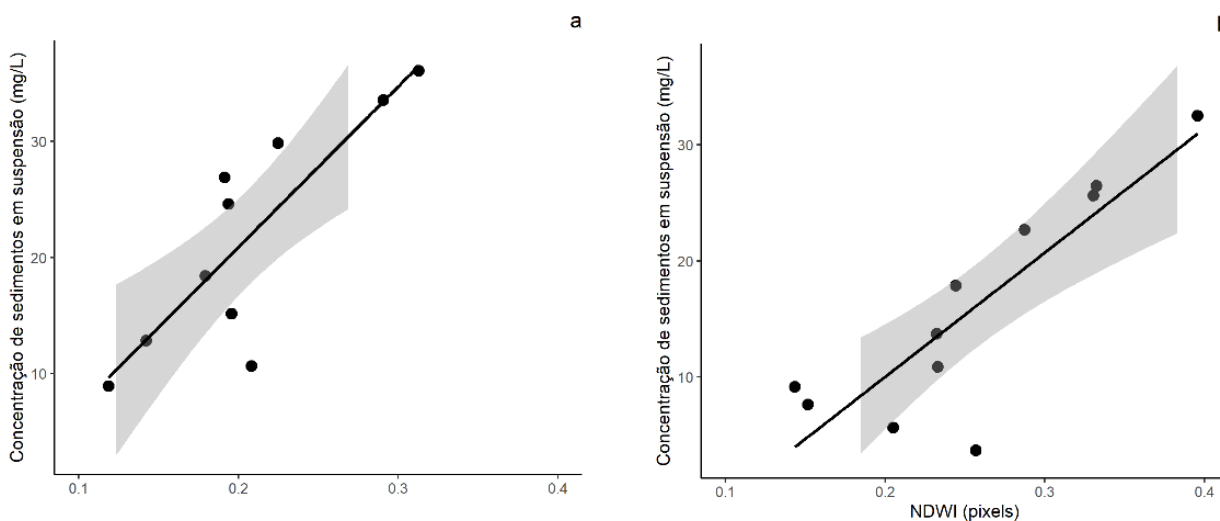
Figura 3. Aplicação do índice NDWI, índice obtido (a) junho/2019 – 0,25 e (b) setembro/2019 – 0,20 - Estação jusante à UHE Sinop.



Na análise dos modelos gerais linearizados, tanto a concentração de sedimentos em suspensão obtida em campo (GLMM gaussiano: $\chi^2 = 2,63$; $p = 0,105$), quanto os valores de NDWI (GLMM gaussiano: $\chi^2 = 2,43$; $p = 0,119$), não variaram entre “Montante 01” e “Jusante Barramento”, ou seja, não verificamos diferenças no material em suspensão entre os locais de amostragem.

A avaliação dos dados foi realizada baseada na análise de regressões lineares simples, em que os valores digitais foram correlacionados com os valores em mg L^{-1} colhidos em campo. Para verificar o potencial do NDWI na estimativa de C_{ss} , os valores digitais (pixels) foram considerados fatores fixos, e a concentração levantada em campo como variável dependente. A correlação entre esses parâmetros gerou a equação da Figura 4, cujos coeficientes de determinação (R^2), apresentaram satisfatórios quanto comparados às equações de estimativa de sedimentos. O coeficiente de determinação R^2 que é a porcentagem de variação da variável dependente, explicada pela variável independente, resultou na avaliação quantitativa do gráfico de dispersão, apresentando coeficiente de determinação (r^2 ajustado) no valor de 0,66 para estação Montante 01 ($p = 0,003$; Figura 04 (a)) e 0,70 para a estação Jusante Barramento ($p < 0,001$; Figura 06 (b)), sugerindo que o modelo de NDWI explica entre 66 e 70% da variação de resposta para as estações Montante 01 e Jusante Barramento, respectivamente.

Figura 4. Relação entre concentração de sedimentos em suspensão com NDWI, para o período compreendido entre 2017 a 2019, **(a)** à montante ($y = -6,77 + 138,28 \cdot x$; $r^2_{adj} = 0,66$; $p = 0,003$) e **(b)** à jusante ($y = -11,41 + 107,12 \cdot x$; $r^2_{adj} = 0,70$; $p = 0,001$) do barramento da UHE Sinop.



É possível afirmar que há uma relação positiva entre os valores de NDWI e os valores de mg/l medidos em campo, isso porque o valor de R^2 obtido é significativo. A função escolhida foi a linear, porque representou a distribuição dos pontos no espaço bidimensional. Essa parte em cinza é o intervalo de confiança, ele é estreito e observa-se que os pontos (dados observados) estão próximos a reta (resultados esperados/ dados estimados). Visualmente o intervalo de confiança do gráfico explica, a largura diz respeito basicamente a diferença entre os dados.

Na Tabela 3 são apresentadas as medidas quantitativas do desempenho do modelo proposto.

Tabela 3. Medidas quantitativas do desempenho da relação do C_{ss} com NDWI, para o período compreendido entre 2017 a 2019, nas seções avaliadas de montante e de jusante à UHE Sinop.

Indicador	Montante	Jusante
C _{ss} - Observado Médio (mg/l)	21,697	15,989
C _{ss} - Estimado Médio (<i>pixel</i>)	21,693	15,983
MAE - Erro Absoluto médio (mg. L ⁻¹)	3,552	3,648
RMSE - Raiz do erro quadrático médio (mg. L ⁻¹)	5,096	4,783
MBE - viés	0,004	0,006
d - Índice de Concordância de concordância de Willmott	0,906	0,916
E _{NS} - Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe	0,701	0,730

Foram obtidos coeficientes de Nash-Sutcliffe (ENS) iguais a 0,701; e 0,730 para as estações Montante 1 e Jusante Barramento, respectivamente. Conforme a classificação do índice ENS é possível afirmar que modelo foi “satisfatório”, para a estimativa de C_{ss} em ambas as estações.

Os valores de “d” ou índice de concordância da Willmott ficaram próximo a 1, sendo 0,906; e 0,916 para as estações Montante 1 e Jusante Barramento, respectivamente, indicando boa concordância entre os valores observados e estimados.

Os valores para viés verificaram a existência de subestimativa pelo modelo nas duas estações. A pequena diferença entre os valores de MAE (erro absoluto médio) e RMSE (raiz quadrada média, que mede os erros entre valores observados/reais e previsões/hipóteses) apontam variância pequena dos erros individuais.

Conclusão

O índice NDWI expressou boa correlação para estimar a concentração de sedimentos em suspensão, apresentando satisfatória relação linear das aflúências e defluências do reservatório da UHE Sinop, apresentando coeficiente de determinação (r^2 ajustado) no valor de 0,66 para estação Montante 01 e 0,70 para a estação Jusante Barramento, podendo ser utilizado como ferramenta para mapeamentos rápidos e com baixo custo.

Com base na análise dos resíduos apresentada, é possível afirmar que a metodologia aplicada na estimativa de C_{ss} por meio de técnicas de sensoriamento remoto teve precisão e acurácia no cenário estudado.

A utilização da técnica de análise das imagens multiespectrais por meio do NDWI aliado as coletas de campo podem reduzir custos de amostragem sem prejuízos aos resultados, porém ainda não deve ser realizada de forma independente pela necessidade da calibração de campo. Assim, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no monitoramento de sólidos em suspensão não se apresenta, no momento, como total substituta as tradicionais coletas de campo, mas como apoio a um monitoramento contínuo e de alerta a possíveis alterações, permitindo melhores avaliações.

O fato das imagens utilizadas na estimativa dos dados, não possuírem datas iguais as das coletas em campo, dos dados observados, pode ter influenciado na não obtenção de um índice de correlação maior, entretanto a metodologia pode ser considerada confiável.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, pelo apoio logístico sempre concedido e ao PPGCAM pela oportunidade em cursar o mestrado. À coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Ainda à Companhia Energética Sinop pela antecipação e cessão dos dados.

Participação dos autores: JMS – Conceitualização, estabelecimento parceria, coleta de dados, análises das imagens e estatísticas, redação do artigo; FTA – Conceitualização, estabelecimento parceria, orientador e supervisor da execução do projeto; EMU – Co-orientador e auxílio nas análises e correção do artigo; LGV – Auxílio nas análises dos dados e correção do artigo.

Aprovação ética ou licenças de pesquisa: Não se aplica ao estudo realizado.

Disponibilidade dos dados: Manuscrito desenvolvido a partir da dissertação de mestrado da primeira autora. Os dados estão disponíveis no Repositório Digital da Educação da Universidade Federal de Mato Grosso - (UFMT) pelo link: <https://reduc.ufmt.br/>

Fomento: A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Ainda à Companhia Energética Sinop pela antecipação e cessão dos dados.

Conflito de Interesses: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

Annandale, GW, Morris, GL, Karki, P. 2016. Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower. Directions in Development--Energy and Mining. Washington, DC: World Bank Extending the Life of Reservoirs. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25085> License: CC BY 3.0 IGO.

Bezerra UA, Silva LTMS, Oliveira LMMO, Neto AR, Almeida DNO, Andrade JM. 2019. Comparativo do Índice NDWI entre os satélites Landsat-8 e Sentinel-2 no entorno do reservatório Poço da Cruz-PE. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10 p. <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/abr/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH0919-1-20190729-215917.pdf>

Borges RO, Camargo FF, Campagnoli F, Bayer M. 2015. Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat 8 para o monitoramento hidroviário. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 6022-6029. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1240.pdf>

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA), CEPTA – Levantamento da ictiofauna, caracterização genética e da fauna parasitária da bacia hidrográfica do rio Tapajós –2011. <http://www.icmbio.gov.br/portal/pesquisa/projetos-apoiados/2011/313-cepta-levantamento-da-ictiofauna-caracterizacao-genetica-e-da-fauna-parasitaria-da-bacia-hidrografica-do-rio-tapajos>

Brenner VC, Guasselli LA. 2015. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 3693-3699. <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0727.pdf>

Campos J, Neto IEL, Studart TM, Campos JNB. 2018. Influence of sediment distribution on the relationships among reservoir yield, spill, and evaporation losses. Engenharia Sanitária e Ambiental 23 (5): 849-856. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018177058>

Carvalho NO. 2008. Hidrossedimentologia prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 599 p.

Chelotti GB, Martinez JM, Roig HL, Olivietti D. 2019. Space-Temporal analysis of suspended sediment in low concentration reservoir by remot sensing. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 24 (17). <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/rcbdD6j8VZVD5pVBqRtDZgR/abstract/?lang=en>

Côrrea EA, Pinto SAF, Junior AC. 2015. Espacialização temporal das perdas de solos em uma microbacia hidrográfica com predomínio de solos arenosos. Geografia 40 (1): 101-118. <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/10349>

Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. Remote Sensing 8 (4): 19 p. <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/4/354>

Fox J, Weisberg JES. 2019. An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

Galharte CA, Villela JM, Crestana S. 2014. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18 (2): 194-201. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000200010>

Gao B. 1996. NDWI - A Normalized Difference Water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58: 257-266. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

- Giardino C, Bresciani M, Stroppiana D, Oggioni A, Morabito G. 2014. Optical remote sensing of lakes: an overview on Lake Maggiore. *Journal of Limnology* 73: 201-214. <http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2014.817>
- Jensen JR. 2009. Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Ed. Parêntese, 598 p. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/367713/mod_resource/content/1/Sensoreamento%20Remoto%20do%20Ambiente%20-%20Cap%C3%ADtulo%201.pdf
- Krause P, Boyle DP, Båse F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences, European Geosciences Union* 5: 89-97. <http://dx.doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Martins VS, Barbosa CCF, Carvalho LAS, Jorge DSE, Lobo FL, Novo EMLM. 2017. Assessment of Atmospheric Correction Methods for Sentinel-2 MSI Images Applied to Amazon Floodplain Lakes. *Remote Sensing* 9 (4): 322 p. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9040322>
- Matos TS, Junior MFS, Wenzel DA, Uliana ME, Almeida FT, Lisboa L, Mendes MASA. 2017. Modelagem hidrológica com o iph ii: estudo de caso para uma sub-bacia hidrográfica do rio Teles Pires. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 p. <https://www.researchgate.net/publication/327110421>
- McFeeters SK. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50 (3): 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nascimento EF, Oliveira LMM, Lima JF, Farias AAM, Silva JG. 2019. Comparação de índices de água na identificação de corpo hídrico por sensoriamento remoto. *Anais XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 4 p. <https://cms.ufmt.br/files/galleries/95/Disserta%C3%A7%C3%B5es%202020/D9a682836ea6b3487d13cba722dae61987aaf2077.pdf>
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, Mcglinn D, Minchin PR, O'hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H. 2019. *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Pereira LE., Amorim G, Grigio AM, Filho ACP. 2018. Análise comparativa entre métodos de índice de água por diferença normalizada (NDWI) em área úmida continental. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ* 41 (2): 654-662. http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_654_662
- Pinese JM. 2014. Avaliação dos sedimentos em suspensão com o uso de imagens multiespectrais nos reservatórios de Caçu e Barra dos Coqueiros – GO. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais. <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16212/1/AvaliacaoSedimentosSuspensao.pdf>
- Queiroz R, Grassi P, Lazzare K, Koppe E, Tartas BRE, Kemerich PDC. 2013. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental* 13 (13): 2774- 2784. <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/9124/pdf>
- R Core Team. 2019. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reinwarth B, Petersen R, Baade J. 2019. Inferring mean rates of sediment yield and catchment erosion from reservoir siltation in the Kruger National Park, South Africa: An uncertainty assessment. *Geomorphology* 324: 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.007>
- Rokni K, Ahmad A, Selamat A, Hazini S. 2014. Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery. *Remote Sensing* 6 (5): 4173–4189. <http://dx.doi.org/10.3390/rs6054173>

Rodrigues TWP, Guimarães US, Rotta LHS, Watanabe FSY, Alcântara E, Imai NN. 2016. Delineamento amostral em reservatórios utilizando imagens LANDSAT-8/OLI: um estudo de caso no reservatório de Nova Avanhandava (estado de São Paulo, Brasil). Boletim de Ciências Geodésicas, 22 (2): 303-323. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000200017>

Souza DAF, Thomé TC, Sobrinho TA. 2019. Payments for ecosystem services as a tool of water security. Anais XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 9 p. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/107/XXIII-SBRH1303-1-20190811-113942.pdf>

Souza MR, Júnior ASR, Silva RR, Cardoso RC, Simões CC. 2019. Análise de microrregiões ótimas para ampliação de Parque Termo Nuclear Brasileiro. Revista Teccen 12 (1): 41-49. <http://dx.doi.org/10.21727/teccen.v12i1.1174>

Souza AP, Mota LL, Zamadei T, Martim CC, Almeida FT, Paulino J. 2013. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. Nativa 1 (1): 34-43. <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a07>

Sterckx S, Knaeps S, Kratzer S, Ruddick K. 2015. SI Milarity Environment Correction (SIMEC) applied to MERIS data over inland and coastal waters. Remote Sensing of Environment 157: 96-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.017>

Tasca FA, Miranda NMG, Rech AS, Caprario J, Pacheco EFE, Finotti AR. 2018. Comparação de estudos hidrossedimentológicos em projetos básicos de pequenas centrais hidrelétricas. Anais 8ª Reunião de Estudos Ambientais, 9 p.

UHE Sinop. Plano de utilização do reservatório – PUR. Sinop Energia: 78 p, 2017.

UHE Sinop. Projeto Básico Ambiental - PBA. Sinop Energia: 680 p, 2013. <https://www.sinopenergia.com.br/wp-content/themes/sinopenergia/img/pba/pba.pdf>

Van Liew MW, Veith TL, Bosch DD, Arnold JG. 2007. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. Journal of Hydrologic Engineering 12 (2): 173-189. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173))

Venables WN, Ripley BD. 2002. Modern applied statistics with S. Fourth Edition. Springer, New York. 495 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>

Vilhena RM., Roig HL, Meneses PR. 2003. Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil-RJ. Anais XI SBR, Belo Horizonte, p. 2649-2651. http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.17.09.42/doc/18_295.pdf

Wickham H. 2016. GGPlot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>

Willmott CJ. Some comments on the evaluation of model performance. 1982. Bulletin American Meteorological Society, 63 (11): 1309-1313. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.