

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

Raphael de Oliveira Borges¹
Flavio Fortes Camargo¹
Fernando Campagnoli²
Maximiliano Bayer³

¹ Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT
SAN Q.03 Bl. A - Ed.Núcleo dos Transportes - CEP: 70.040-902 - Brasília-DF
{raphael.borges, flavio.camargo}@dnit.gov.br

² Secretaria de Patrimônio da União - SPU
Esplanada dos Ministérios - Bloco C - 2º andar - CEP: 70.046-900 - Brasília-DF
fernando.campagnoli@planejamento.gov.br

³ Universidade Federal de Goiás - UFG
Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Rua Jacarandá s/n, Qd. D, Campus Samambaia, Cx.
Postal 131 - CEP: 74001-970 - Goiânia-GO
maxibayer@yahoo.com.ar

Abstract. The use of remote sensing in support of hydrological studies has become common in recent years. Among the methods and techniques of image processing in order to hydrological analysis, we highlight the Normalized Difference Water Index (NDWI), a method developed with the purpose of enhance in the images, features present in the aquatic environment. This study evaluates the potential of this index in Landsat 8, identifying and mapping the flow of suspended sediments in waterways, applying it in a test area in the Araguaia River. The selected scenes showed differences of a few days in relation to the dates of field sampling, because the field surveys did not occur on the exact day of imaging, or, in other cases, there was a strong presence of clouds in the scenes. To enhance the water bodies, the NDWI equation, using the corresponding bands at 860nm and 1240nm was applied. To apply it on Landsat 8, were chosen bands 5 (850nm-880nm) and 6 (1570nm-1650nm), the use of images of these bands provides better separation condition of water bodies. The NDWI values were correlated with the concentrations collected in the field, where we obtained an R^2 of 0.8533, and the Pearson coefficient of 0.9237, showing strong positive correlation between the variables, furthermore, the spatial variations of NDWI values are in agreement with the findings of sedimentometric research carried out in the region. This work opens a perspective of using these techniques to other waterway and can develop a good sedimentometric monitoring in Brazilian waterways.

Palavras-chave: NDWI, hydrological analysis, suspended sediments, waterways, NDWI, análises hidrológicas, sedimentos em suspensão, hidrovias.

1. Introdução

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em apoio aos estudos hidrológicos já se tornou comum nos últimos anos. Imagens orbitais e aerotransportadas são corriqueiramente utilizadas, com base em seus valores de reflectância da água, para mapeamento e delineamento de corpos d'água, verificação e controle da qualidade física da água, mensuração de turbidez e da concentração de sedimentos, detecção e classificação de plantas aquáticas, bem como a estimativa de profundidade, possibilitando a confecção de cartas de navegação confiáveis e atualizadas.

A utilização de imagens orbitais para realização destes estudos, nos permite uma diminuição dos custos envolvidos, maior rapidez e constância no acesso aos dados e ainda possibilita uma avaliação espacial ampla, analisando com maior precisão e detalhamento as relações entre os corpos d'água e os outros elementos presentes na região ou bacia hidrográfica estudada.

Dentre os métodos e técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto com vistas à análise hidrológica, destaca-se aqui o Índice da Diferença Normalizada de Água

(*Normalized Difference Water Index* – NDWI), um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições presentes no ambiente aquático, e realçar a presença das mesmas nas imagens.

Este método é derivado do Índice da Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*). McFeeters (1996) modificou a fórmula do NDVI invertendo as variáveis e usando a banda verde ao invés da banda vermelha, a fim de obter melhores resultados voltados à água. No presente trabalho é utilizada a metodologia proposta por Gao (1996), que aplicou o NDWI baseado nas bandas do infravermelho próximo e do infravermelho médio do TM/Landsat, o qual o correlacionou com o conteúdo de água nos vegetais e conseguiu acompanhar melhor as mudanças na biomassa e nos estresses de umidade das plantas do que com o NDVI.

Considerando assim o NDWI como ferramenta para delinear características da água, enquanto simultaneamente elimina características do solo e da vegetação terrestre (McFeeters, 1996), este trabalho propõe avaliar o potencial deste índice, extraído a partir de imagens do sensor Landsat 8, na identificação e mapeamento dos fluxos de sedimentos em suspensão, com vistas a criação de um monitoramento sedimentométrico em trechos hidroviários, aplicando-o em uma área teste no médio curso do Rio Araguaia, selecionada devido à disponibilidade de levantamentos campo, com dados georreferenciados de concentração de sedimentos em suspensão, o que possibilitou uma melhor avaliação do comportamento destas feições nas imagens avaliadas.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo se localiza na divisa dos estados de Goiás e Mato Grosso (Figura 1), e corresponde ao trecho do Rio Araguaia compreendido na cena 223/070 do sensor Landsat8, trecho este pertencente ao médio curso do Rio Araguaia, assim classificado conforme suas características geomorfológicas e de seu comportamento hidrológico (Bayer, 2010).

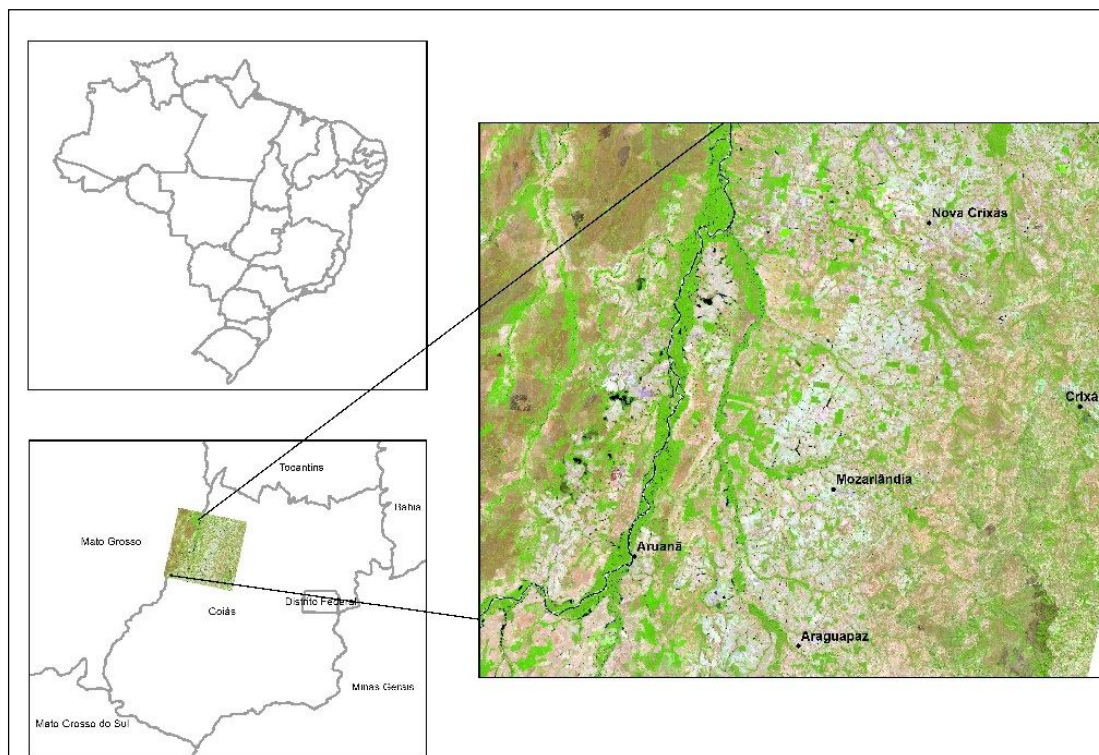


Figura 1. Localização do trecho estudado (Composição colorida LANDSAT-8 R6G5B4).

O referido trecho corresponde a um trecho hidroviário gerido pela Administração das Hidrovias do Tocantins e Araguaia (AHITAR), sob responsabilidade do DNIT. O Rio Araguaia possui uma extensão de 2.115 quilômetros, dos quais 1.818 são navegáveis, onde a navegação ocorre basicamente de sua foz, no Rio Tocantins, até a cidade de Baliza-GO.

Segundo ANTAQ (2013) o primeiro trecho navegável possui profundidade mínima de 1 metro e estende-se por 1.472 quilômetros, desde a foz até a cidade de Aruanã-GO, o segundo trecho parte de Aruanã-GO e vai até Barra do Garças-MT, com 288 quilômetros de extensão e 0,9 metros de profundidade mínima, por fim, o terceiro trecho parte de Barra das Garças-MT até o município de Baliza-GO, que corresponde a mais 58 quilômetros de extensão navegável, com profundidade mínima de 0,8 metros. De acordo com a Agência Nacional de Águas (2005), a navegação no Rio Araguaia ocorre apenas no período de cheias, entre os meses de dezembro e maio.

O trecho em estudo abrange parte do primeiro trecho navegável da foz até a cidade de Aruanã-GO e também uma parte do segundo trecho navegável de Aruanã-GO até a cidade de Barra do Garças-MT.

2.2 Dados Utilizados

Foram utilizadas imagens do sensor Landsat-8 (*WRS Path: 223; WRS Row: 070*), de 4 datas distintas, datas estas escolhidas conforme compatibilidade com as datas de coletas de material em campo, foram selecionadas as cenas das datas 03/04/2013 - 11/07/2013 - 03/01/2014 e 15/08/2014, que foram obtidas gratuitamente na página do *United States Geological Survey* (USGS): <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

As cenas selecionadas apresentaram diferença de alguns dias em relação às datas das coletas de campo, devido ao fato de que a base de dados dos levantamentos de campo não dispunham de coletas nos dias exatos de imageamento, ou então, quando apresentavam, havia a forte presença de nuvens nas cenas, o que inviabilizava a análise das imagens.

As datas de coletas de campo e imagens selecionadas, obedeceram ao padrão de dois períodos de cheia e dois períodos de vazante no trecho estudado do rio, foram selecionados dados de concentração de sedimentos em suspensão, em mg/l, para quatro datas distintas na estação hidrométrica de Aruanã-GO, em 3 pontos georreferenciados nas duas margens e no centro do rio (Figura 2). Datas estas de: 02/03/2013 (1 mês de diferença em relação à imagem); 08/07/2013 (3 dias de diferença); 04/12/2013 (1 mês de diferença) e 14/08/2014 (1 dia de diferença), obtendo-se assim 12 valores amostrados de sedimentos em suspensão.



Figura 2. Localização dos pontos de coletas em campo de sedimentos em suspensão na cidade de Aruanã-GO.

Conforme Bayer (2010), as amostras de sedimentos transportados em suspensão são obtidas utilizando garrafas de van Dorn em três eixos verticais em cada seção transversal do canal, com duas amostras por eixo vertical (20 e 60% da profundidade) e três no talvegue, obtendo-se, logo no processo uma concentração média que constitui o dado hidrológico utilizado no cálculo de transporte de carga em suspensão.

O método de determinação da concentração de sedimentos suspensos utilizado é o definido por Carvalho et al. (2000), que consiste na filtragem de uma parte da amostra através de membrana de éster celulose de 0,45 µm de poro e 47 mm de diâmetro, e posteriormente secada e pesada.

2.3 Processamento dos Dados

As imagens Landsat 8 foram selecionadas para este estudo, principalmente, devido à sua gratuidade e fácil acesso para aquisição das mesmas. O que nos permite, uma diminuição dos custos envolvidos na aquisição de dados de sensoriamento remoto, e nos dá uma maior rapidez e constância no acesso aos dados, disponíveis a cada 16 dias para a mesma região.

Outra grande vantagem destacada neste novo sensor Landsat, é a sua resolução radiométrica, o que permite registrar variações de intensidade de sinal discretizadas em 16 bits, tornando possível detectar variações de energia refletida pelos ambientes aquáticos (caracterizados por baixa intensidade de sinal). Ou seja, é possível constatar uma maior riqueza de informações sobre a cor da água. Segundo Martinez et al. (2009), a presença de material particulado e dissolvido nas águas, afeta os processos de absorção e espalhamento da luz, logo existe uma correlação entre as propriedades óticas e a qualidade ou conteúdo de sedimentos presentes.

Assim, para realçar os corpos d'água, foi aplicada a Equação 1, proposta por Gao (1996), utilizando dados de reflectância das bandas correspondentes a 860nm e 1240nm, respectivamente. O motivo dessa escolha está no comportamento espectral da água. Na faixa próxima de 860nm a reflectância esperada da água é muito baixa e na faixa de 1240nm, a reflectância esperada é zero. Assim, para corpos d'água, é esperado que a Equação 1 forneça valores $NDWI \geq 0$ ou seja, nas imagens geradas pelo NDWI os corpos d'água terão alto valor de brilho (Polidoro et al., 2004).

$$NDWI = \frac{R_{860} - R_{1240}}{R_{860} + R_{1240}} \quad (1)$$

Para se aplicar a Equação 1 em imagens adquiridas pelo Landsat 8, foram escolhidas as reflectâncias das bandas 5 (850nm-880nm) e 6 (1570nm-1650nm). A banda 5 vem a realçar a vegetação com alto valor de brilho e corpo d'água com baixo valor de brilho. A banda 6 também irá realçar o corpo d'água com baixo valor de brilho no entanto, nesta banda, os altos valores são produzidos por áreas de solo exposto. O uso simples das imagens das bandas 5 e 6 oferece melhor condição de separação de corpos d'água pois, em ambos os casos, eles se apresentam com baixo valor de brilho, contrastando com outras feições presentes (Polidorio et al., 2004).

Este procedimento de matemática de bandas foi realizado no software ENVI 4.8, onde após a geração dos NDWI para as 4 imagens selecionadas, procedeu-se à extração das feições de corpos d'água das imagens, gerando máscaras de drenagens a partir de imagens classificadas para cada cena trabalhada. A partir destas classificações, foi efetuada a vetorização automática da calha do Rio Araguaia, no *software* ArcGIS 10.2.2, nas 4 cenas selecionadas.

Extraídas as vetorizações da calha do rio, foram feitos os recortes dos quatro NDWI gerados, no software ENVI 4.8, extraíndo apenas as informações referentes à lâmina d'água,

nas quatro datas selecionadas. Por fim, foram efetuados os cruzamentos dos NDWI gerados, com os 12 valores de sedimentos em suspensão colhidos em campo, já no *software* ArcGIS 10.2.2, para, a partir daí, se realizarem as análises estatísticas.

2.4 Análise Estatística

Para cada ponto coletado em campo, das concentrações médias em mg/l de sedimentos em suspensão, foram coletados os valores de NDWI nas imagens Landsat 8. Este procedimento foi realizado no *software* ArcGIS 10.2.2, utilizando a ferramenta *Spatial Analyst*.

Posteriormente, foram realizadas regressões lineares simples nos conjuntos de dados para corroborar a existência de relação entre os mg/l e o NDWI. As análises dos resultados foram conduzidas por meio da avaliação qualitativa de gráfico de dispersão e da avaliação quantitativa dos coeficientes de correlação de Pearson (R), de determinação (R^2) e da aplicação do teste de hipóteses *t* de *Student*.

3. Resultados e Discussões

3.1 Avaliação Estatística

Após o cruzamento dos dados, obteve-se a tabela de valores de NDWI, em conjunto com os valores de concentração de sedimentos em suspensão (Tabela 1).

Tabela 1. Valores coletados de sedimentos em suspensão e respectivo valor de NDWI

Local de Coleta	Data da Coleta	Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/l)	Data da imagem	NDWI
Margem Direita	02/03/2013	144.00	03/04/2013	0.0947452
Margem Esquerda	02/03/2013	168.50	03/04/2013	0.1914150
Meio do Rio	02/03/2013	178.00	03/04/2013	0.1927030
Margem Direita	08/07/2013	28.00	11/07/2013	0.0568182
Margem Esquerda	08/07/2013	32.00	11/07/2013	0.0570152
Meio do Rio	08/07/2013	36.00	11/07/2013	0.0574051
Margem Direita	04/12/2013	177.00	03/01/2014	0.1254220
Meio do Rio	04/12/2013	187.00	03/01/2014	0.2071320
Margem Esquerda	04/12/2013	192.00	03/01/2014	0.2145700
Margem Direita	14/08/2014	22.00	15/08/2014	0.0547233
Meio do Rio	14/08/2014	22.00	15/08/2014	0.0549855
Margem Esquerda	14/08/2014	26.00	15/08/2014	0.0558148

A fim de se gerar os fluxos de sedimentos em suspensão, a partir do modelo utilizando o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), os valores digitais foram correlacionados com os valores em mg/l colhidos em campo. Assim, foi gerada a Figura 3, o gráfico de dispersão, com as concentrações levantadas em campo como variável dependente, de modo a avaliar o potencial do NDWI na estimativa destes valores, com a equação que explica o modelo e o coeficiente de determinação no valor de 0,8533, o que significa que cerca de 85% da variação de resposta pode ser explicado pelo modelo de NDWI. Já o coeficiente de correlação de Pearson, apresentou valor de 0,9237, correlação forte positiva entre as duas variáveis.

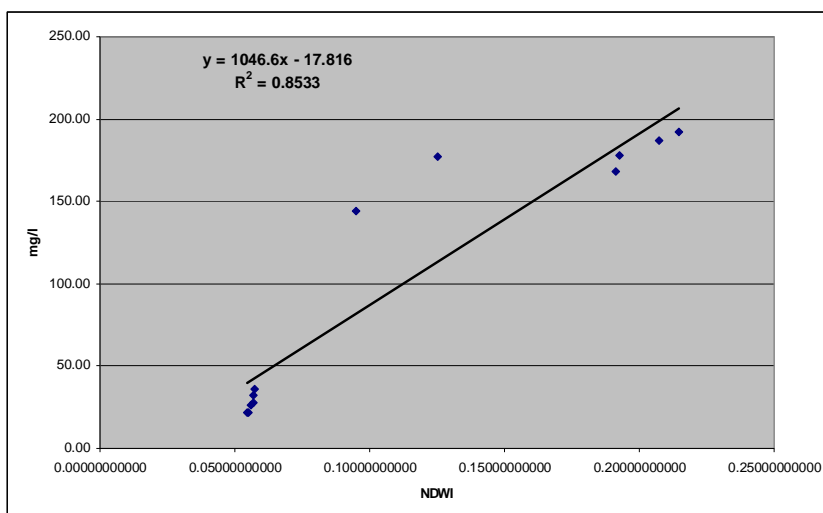


Figura 3. Comportamento dos valores digitais do NDWI em relação à variação de profundidade.

Após a análise qualitativa do gráfico de dispersão, foi aplicado o teste *t* de *Student* para a verificação quantitativa da significância dos valores de r^2 obtidos. Os testes foram realizados utilizando as 12 amostras, com um nível de significância (α) de 5% e foram calculados os valores críticos uni e bicaudal. A Tabela 2 apresenta as estatísticas obtidas para o teste empregado.

Tabela 2. Estatísticas dos testes *t* de *Student* obtidas

	MG/L	NDWI
Média	101.0416667	0.113562442
Variância	6019.020833	0.004688729
Observações	12	12
Correlação de Pearson	0.923756812	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	11	
Stat t	4.510181501	
P(T<=t) uni-caudal	0.000443118	
t crítico uni-caudal	1.795884814	
P(T<=t) bi-caudal	0.000886235	
t crítico bi-caudal	2.200985159	

Considerando o teste bicaudal, observa-se na Tabela 2 que o valor de *t* calculado é superior ao valor crítico tabelado de *t* para o teste bicaudal. Isto significa que o valor de r^2 obtido é significativo estatisticamente. Ou seja, há uma relação linear positiva entre os valores de NDWI e os valores de mg/l medidos em campo. De modo geral, as estatísticas dos testes *t* corroboraram as constatações obtidas pela análise qualitativa do gráfico de dispersão.

3.2 Fluxos de sedimentos identificados

Com base no exposto, e nos dados apresentados, infere-se que o NDWI das imagens Landsat 8, corresponde a um bom parâmetro de análise da variação das taxas de concentração de sedimentos em suspensão em corpos d'água.

A análise visual da variação dos valores de NDWI, identificados na área em estudo, corrobora com esta conclusão, pois as variações espaciais identificadas nas imagens, vêm de encontro às conclusões de pesquisas sedimentométricas efetuadas na região nos últimos anos.

O canal do médio rio Araguaia, área em estudo, se caracteriza por apresentar trechos com distintos padrões de instabilidade lateral e com uma constante evolução morfológica que

revela o predomínio da sedimentação sobre a erosão (Bayer, 2002, Latrubesse et al. 2009). As concentrações de sedimentos em suspensão medidas ao longo da alta e média bacia do Araguaia apresentam valores considerados como “baixos” (< 150 mg/l), segundo a classificação de Carvalho et al. (2000). Os valores de concentrações de sedimentos suspensos nos canais principais dos afluentes, no entanto, são ainda menores, podendo ser considerados como “muito baixos” (<50 mg/l) ainda que, muito localmente, afluentes menores apresentem concentrações elevadas quando associados a setores da bacia com intensos processos erosivos (Bayer, 2010).

Uma outra particularidade na distribuição de valores de concentração de sedimentos em suspensão ao longo do rio, ficou evidenciada nas sucessivas coletas de sedimentos realizadas por Bayer (2010) no trecho Goiano da planície. É notório o progressivo incremento nos valores de concentração de sedimentos em suspensão de montante à jusante, ainda no mesmo período de coleta. Em coletas realizadas no período de Julho, constata-se que os valores de concentrações oscilaram entre 20-30 mg/l à montante da planície, aumentando até 70-100 mg/l ao norte da área em estudo, em aproximadamente 300 km de percurso (Bayer, 2010).

As figuras a seguir, exemplificam, por meio da variação espacial dos valores de NDWI, estas condições ambientais verificadas em campo pelas pesquisas na região.

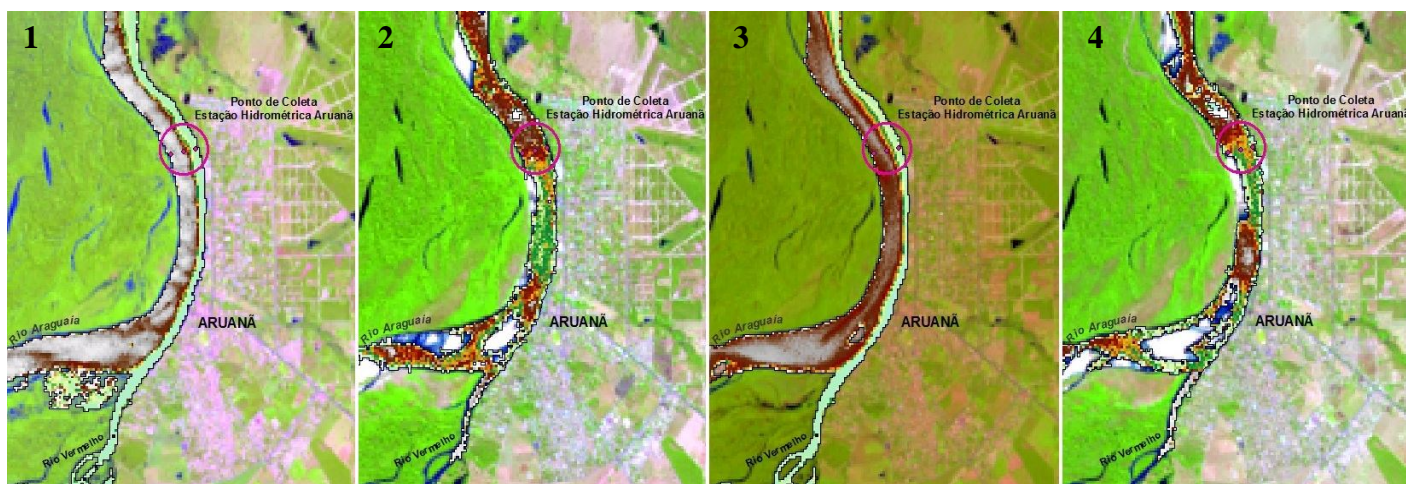


Figura 4. Variação do NDWI na calha do Rio Araguaia, na cidade de Aruanã-GO, em: 1) 03/04/2013; 2) 11/07/2013; 3)03/01/2014; 4) 15/08/2014

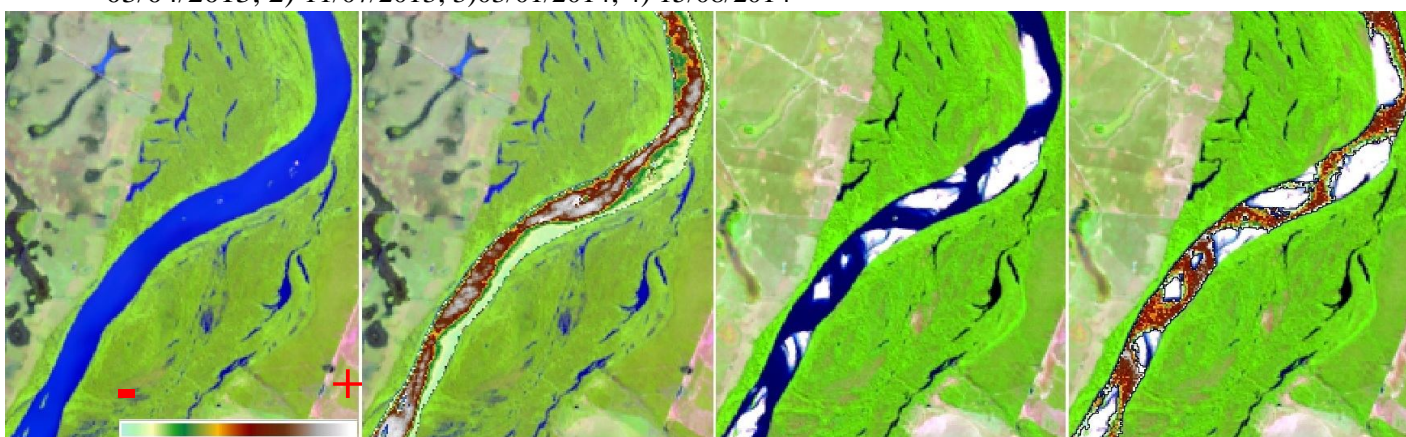


Figura 5. Variação do NDWI na calha do Rio Araguaia, em: 03/04/2013 (cheia) e 11/07/2013 (vazante)

Na figura 4 nota-se menores valores de NDWI no Rio Vermelho, tributário do Araguaia, principalmente no período chuvoso, de cheia do rio, mantendo-se estes valores menores às

margens e aumentando os valores no meio do rio, assim como observado nas pesquisas de campo, para os dados de sedimentos em suspensão.

Já na figura 5, observa-se o processo descrito por Bayer (2010), como o de desenvolvimento de barras laterais dispostas alternadamente nas margens do canal. Estes bancos de areia laterais apresentam uma topografia suavemente inclinada, perdendo altura em direção ao centro do canal. Na imagem NDWI do período da cheia, pode-se notar que os menores valores, coincidem, em sua maioria, com as barras laterais emergidas durante a vazante, o que corrobora sua associação com a concentração de sedimentos em suspensão, pois menores valores de concentração em suspensão indicam ambientes de baixo transporte e alta acumulação de sedimentos.

4. Conclusões

Os resultados obtidos corroboram a hipótese levantada de que há uma relação linear positiva entre o NDWI e os valores de concentração de sedimentos em suspensão mensurados em campo.

O trabalho nos mostra que a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto constitui uma importante ferramenta de otimização no monitoramento hidrossedimentológico. Estes métodos obviamente não substituem o monitoramento convencional, em campo, porém trazem a possibilidade de que, com o avanço destes estudos, áreas de difícil acesso, e sem cobertura da rede de monitoramento atual, possam vir a ser acompanhadas de maneira remota, a partir de estudos de validação com mais dados coletados em campo.

Este trabalho levanta a discussão e abre uma perspectiva de uso destas técnicas, para outros trechos hidroviários, com maiores larguras, profundidades e movimentação de embarcações, melhorando tanto quantitativa quanto qualitativamente os dados, podendo se criar assim, um bom monitoramento sedimentométrico nas hidrovias brasileiras.

Referências Bibliográficas

- ANTAQ. **Plano Nacional de Integração Hidroviária**. Brasília: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, 2013. 48 p.
- Bayer, M. **Diagnóstico dos processos de erosão/assoreamento na planície aluvial do rio Araguaia: entre Barra do Garças e Cocalinho**. 2002. p.138. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.
- Bayer, M. **Dinâmica do transporte, composição e estratigrafia dos sedimentos da planície aluvial do Rio Araguaia**. 2010. 104p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2010.
- Carvalho N.O.; Filizola N.P. ; Santos P.M.C.; Lima, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. (2000) 154 p.
- Gao, B.-C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.
- Latrubesse, E.M.; Amsler, M.; Morais,R.P.; Aquino, S. The Geomorphologic response of a large pristine alluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: the case of the Araguaia River. **Geomorphology**. v. 113, p. 239- 252, 2009.
- Martinez, J. M, Filizola, N., Guyot, J. L., Sondag, F. **Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data**. 2009
- Mcfeeters, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.
- Polidorio, A. M.; Imai, N.; Tommaselli, A.M.G. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In: Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (SIMGEO), 1, 2004, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2004. Disponível em: < <https://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/>>. Acesso em: 27 out. 2014.